

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ivan Carek**

Zagreb, 2014. SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

Ivan Carek

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem profesoru dr.sc. Zoranu Kožuhu na mentorstvu, asistentici dr.sc. Tanji Tomić na svesrdnoj stručnoj pomoći i strpljenju u izradi ovog rada, te docentu dr.sc. Ivici Garašiću na pomoći i korisnoj literaturi.

Također se zahvaljujem i djelatnicima Laboratorija za zavarivanje, Laboratorija za strojnu obradu, Laboratorija za toplinsku obradu i Laboratorija za mehanička ispitivanja za pomoć u izradi eksperimenta.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji na podršci i motivaciji tijekom čitavog školovanja, ovaj rad je i njihov uspjeh.

Ivan Carek

**SADRŽAJ:**

SADRŽAJ: .....	I
POPIS SLIKA: .....	III
POPIS TABLICA .....	V
SAŽETAK .....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD .....	1
2. ZAOSTALA NAPREZANJA I DEFORMACIJE U ZAVARENIM SPOJEVIMA .....	2
2.1. Vrste deformacija u zavarenim spojevima .....	4
3. TOPLINSKA OBRADA METALA .....	5
4. TOPLINSKA OBRADA ZAVARENIH SPOJEVA .....	6
5. POSTUPAK TOPLINSKE OBRADU ZAVARENIH SPOJEVA PRIJE IZVOĐENJA ZAVARIVANJA .....	7
5.1. Predgrijavanje .....	7
5.1.1. Određivanje temperature predgrijavanja .....	8
5.1.2. Primjena predgrijavanja ovisno o materijalu .....	8
5.1.3. Praktične smjernice za predgrijavanje kod zavarivanja .....	9
6. POSTUPCI TOPLINSKE OBRADU ZAVARENIH SPOJEVA NAKON IZVOĐENJA ZAVARIVANJA ..	10
6.1. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja .....	10
6.2. Normalizacijsko žarenje .....	13
6.3. Poboljšavanje .....	16
6.4. Toplinska obrada sniženja tvrdoće .....	17
6.5. Gašenje .....	18
6.6. Kaljenje .....	19
7. PRINCIPI RADA I OPREMA ZA TOPLINSKI OBRADU U ZAVARIVANJU .....	20
7.1. Osnovni zahtjevi opreme za toplinsku obradu .....	20
7.2. Peći za toplinsku obradu .....	21
7.3. Predgrijavanje i žarenje plinskim plamenom .....	22
7.4. Elektrootporno predgrijavanje i žarenje .....	23
7.5. Indukcijsko predgrijavanje i žarenje .....	25
8. PRIMJERI TOPLINSKE OBRADU ZAVARENIH SPOJEVA IZ INDUSTRIJE .....	27



8.1. Problematika zavarivanja suvremenog čelika ASTM A335 P92 u kotlovskoj industriji .....	27
8.2. Utjecaj toplinske obrade na svojstva zavara kod zavarivanja cijevi u čvorištu .....	31
9. SITNOZRNATI ČELICI .....	34
9.1. Osnovne grupe sitnozrnatih čelika .....	35
9.1.1. Normalizacijski valjani sitnozrnati čelici.....	35
9.1.2. Poboļjšani sitnozrnati čelici .....	35
9.1.3. Termomehanički valjani sitnozrnati čelici.....	36
9.1.4. TMCP čelici.....	37
9.2. Toplinska obrada sitnozrnatih čelika nakon zavarivanja .....	38
9.3. Nastanak hladnih pukotina .....	38
9.4. Čelik SA516 Gr 70 Mod LTV.....	39
10. EKSPERIMENTALNI DIO.....	41
10.1. Uvod u eksperiment.....	41
11. ZAVARIVANJE .....	42
11.1. Priprema za zavarivanje .....	42
11.2. Predgrijavanje.....	43
11.3. Zavarivanje.....	44
11.3.1. Dodatni materijal i zaštitni plin za zavarivanje.....	47
12. TOPLINSKA OBRADA ZAVARENIH RADNIH KOMADA .....	48
12.1. Dio 1 – Zagrijavanje za odstranjivanje vodika .....	48
12.2. Dio 2 – Toplinska obrada u vakumskoj peći .....	48
13. IZRADA UZORAKA ZA ISPITIVANJE .....	50
14. ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA.....	51
14.1. Statičko vlačno ispitivanje.....	51
14.2. Ispitivanje udarnog rada loma (žilavosti) – metoda Charpy .....	56
14.3. Mjerenje tvrdoće – Vickers metoda.....	58
15. ANALIZA REZULTATA MEHANIČKIH ISPITIVANJA .....	62
16. ZAKLJUČAK .....	64
LITERATURA.....	65
PRILOZI .....	68

**POPIS SLIKA:**

Slika 1. Promjene strukture i raspodjela tvrdoće kod zavarivanja niskolegiranih čelika .....	2
Slika 2. Shematski prikaz naprezanja u zavaru .....	3
Slika 3. Raspored naprezanja u zavaru .....	4
Slika 4. Prikaz vrsti deformacija kod zavarivanja (uzdužna, poprečna, uzdužno-poprečna i kutna deformacija) .....	4
Slika 5. Dijagram postupka toplinske obrade .....	5
Slika 6. Dijagram žarenja za redukciju zaostalih naprezanja .....	11
Slika 7. Dijagram normalizacijskog žarenja .....	13
Slika 8. Usitnjenje zrna normalizacijom kod ugljičnog čelika sa 0,5 % ugljika .....	14
Slika 9. Nejednolik raspored ferita i perlita zbog presporog hlađenja u području precipitacije ferita (između temperatura Ar3 i Ar1) .....	14
Slika 10. Formirani igličasti ferit (Widmannstättenova struktura) uslijed prebrzog ohlađivanja u području precipitacije ferita (između temperatura Ar3 i Ar1) .....	15
Slika 11. Dijagram poboljšavanja zavarenog spoja .....	16
Slika 12. Dijagram snižavanja tvrdoće (popuštanja) .....	17
Slika 13. Dijagram gašenja CrNi i CrMn čelika .....	18
Slika 14. Izvedba stabilne peći za toplinsku obradu .....	21
Slika 15. Toplinska obrada cijevi plinskim plamenom .....	22
Slika 16. Matica za učvršćivanje termoparova na zavar .....	23
Slika 17. Krivulje potrebnog učinka u ovisnosti o dimenzijama cijevi .....	25
Slika 18. Uređaj za indukcijsko zagrijavanje cijevi .....	26
Slika 19. Teoretski dijagram toplinske obrade za čelik ASTM A355 P92 .....	29
Slika 20. Makroizbrusak zavora TIG + EPP .....	29
Slika 21. Stroj za iskop kamena .....	31
Slika 22. Čvorište cijevi za izradu krana stroja za iskop kamena .....	32

Slika 23. Radni komad spreman za proces toplinske obrade .....	33
Slika 24. Dijagram tvrdoće prije (plava krivulja) i nakon (roza krivulja) toplinske obrade ....	33
Slika 25. Podjela sitnozrnatih čelika .....	35
Slika 26. Shematski prikaz TMCP postupka.....	37
Slika 27. Mikrostruktura čelika SA 516 Gr 70 Mod LTV .....	40
Slika 28. Plinsko rezanje ploča .....	42
Slika 29. Priprema spoja.....	43
Slika 30. Predgrijavanje plinskim plamenom .....	43
Slika 31. Uređaj za zavarivanje.....	44
Slika 32. Prikaz slaganja prolaza prilikom zavarivanja .....	45
Slika 33. Problematici uski žlijeb (12-ti prolaz) .....	46
Slika 34. Dijagram toplinske obrade dijela 2 .....	48
Slika 35. Pozicije izrezivanja uzoraka.....	50
Slika 36. Dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje.....	51
Slika 37. Radno mjesto izvođenja statičkog vlačnog pokusa.....	52
Slika 38. Epruvete za statički vlačni pokus nakon provedenog ispitivanja .....	53
Slika 39. Dijagram „sila – produljenje“ za epruvetu 1-1 .....	53
Slika 40. Dijagram „sila – produljenje“ za epruvetu 1-2 .....	54
Slika 41. Dijagram „sila – produljenje“ za epruvetu 2-1 .....	54
Slika 42. Dijagram „sila – produljenje“ za epruvetu 2-2 .....	55
Slika 43. Shema Charpyevog bata za ispitivanje udarnog rada loma .....	56
Slika 44. Dimenzije uzoraka za ispitivanje udarne radnje loma .....	56
Slika 45. Shematski prikaz indentora i otiska kod metode po Vickersu .....	59
Slika 46. Makroizbrusak iz dijela bez toplinske obrade s označenim točkama mjerenja tvrdoće.....	59
Slika 47. Makroizbrusak iz dijela podvrgnutog toplinskoj obradi s označenim točkama mjerenja tvrdoće.....	60

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Uvjeti žarenja za redukciju zaostalih naprezanja čelika za kotlogradnju.....	10
Tablica 2. Preporučene temperature za snižavanje tvrdoće .....	17
Tablica 3. Kemijski sastav čelika ASTM A335 P92.....	27
Tablica 4. Osnovni parametri zavarivanja TIG + EPP .....	28
Tablica 5. Rezultati ispitivanja .....	30
Tablica 6. Kemijski sastav čelika za izradu cijevi .....	32
Tablica 7. Kemijski sastav čelika SA516 Gr 70 Mod LTV .....	39
Tablica 8. Parametri zavarivanja .....	45
Tablica 9. Kemijski sastav dodatnog materijala.....	47
Tablica 10. Mehanička svojstva dodatnog materijala .....	47
Tablica 11. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja.....	52
Tablica 12. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma (pri 0°C) .....	57
Tablica 13. Prosječni rezultati mjerenja tvrdoće u uzorcima .....	61
Tablica 14. Utjecaj toplinske obrade na mehanička svojstva zavarenog spoja.....	62

## **SAŽETAK**

U ovom radu ispitan je utjecaj toplinske obrade na svojstva zavara čelika SA 516 Gr.70 Mod LTV.

U teorijskom dijelu dan je kratak pregled načina toplinske obrade čelika uz neke primjere iz prakse, te su prikazane osnovne informacije o sitnozrnatim čelicima, njihovim posebnostima i svojstvima.

Eksperimentalni dio obuhvatio je pripremu radnih komada za zavarivanje, zavarivanje, toplinsku obradu, izradu uzoraka, izvođenje mehaničkih ispitivanja i analizu dobivenih rezultata.

Analizom rezultata dobivenih izvođenjem mehaničkih ispitivanja doneseni su zaključci o ispravnosti i isplativosti provedbe toplinske obrade zavarenog spoja čelika SA516 Gr.70 Mod LTV.

Ključne riječi:

Toplinska obrada, sitnozrnati čelici, čelik SA 516 Gr.70 Mod LTV, ispitivanje mehaničkih svojstava

## **SUMMARY**

This paper reflects the influence of post weld heat treatment in welds made out of the steel SA 516 Gr.70 Mod LTV.

The theoretical part gives a short overview of the heat treatment of steel with some practical examples from industry, and presents basic information about the fine grain steels, their peculiarities and characteristics.

The experimental part included the preparation of workpieces for welding, welding, heat treatment, test samples making, testing of mechanical properties and analyzing the results.

The analysis of the results obtained by performing mechanical tests showed effectiveness and feasibility of implementation of heat treatment on welded joints, made of SA 516 Gr.70 Mod LTV steel.

Key words:

Post weld heat treatment (PWHT), fine grain steels, SA 516 Gr.70 Mod LTV steel, mechanical properties testing

## 1. UVOD

Toplinska obrada zavarenih spojeva provodi se s ciljem vraćanja osnovnih (ili postizanja boljih) svojstava metala koja su promijenjena zavarivanjem. Budući da spajanje konstrukcijskih dijelova zavarivanjem ima brojne prednosti nad vijčanim i zakovičnim spojevima, kao postupak spajanja najčešće se koristi tehnologija zavarivanja. Zavareni spojevi mogu biti izvedeni na kvalitetan i manje kvalitetan način, a za provjeru toga služe različita ispitivanja i kontrole. Na kvalitetu zavarenog spoja utječe toplinska obrada provedena prije, tijekom ili nakon zavarivanja. Izbor vrste i režima toplinske obrade ovisi o vrsti materijala, i veličini promjena koje su nastale u zavarenom spoju.

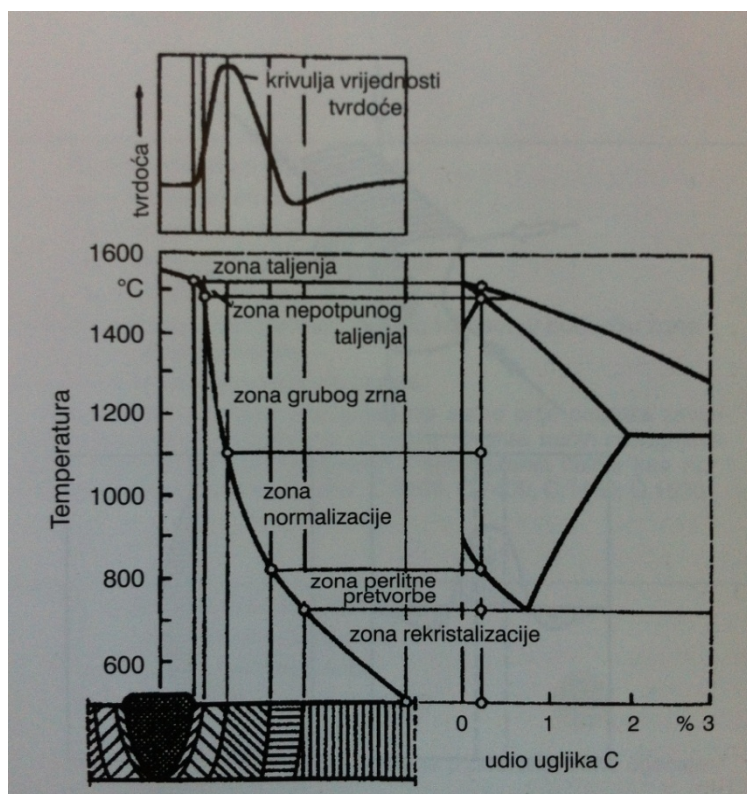
U teorijskom dijelu ovog rada prikazane su osnove toplinske obrade metala te njezin utjecaj na promjenu svojstava zavarenog spoja. Također je dan kratki pregled sitnozrnatih čelika. Eksperimentalni rad proveden je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, gdje se analizirao utjecaj naknadne toplinske obrade na svojstva zavarenog spoja sitnozrnatog čelika SA 516 gr70 MOD LTV. U određenim uvjetima provedeno je zavarivanje radnog komada. Nakon zavarivanja radni komad je plinskim plamenom prerezan na dva jednaka dijela. Jedan dio podvrgnut je toplinskoj obradi, a drugi dio je tek naknadno zagrijavan pri temperaturi 200 °C u trajanju od dva sata. Po završetku toplinske obrade, shodno normi EN 15614-1:2007 napravljeni su uzorci za ispitivanje i utvrđivanje mehaničkih svojstava zavarenog spoja.

Analizom rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava doneseni su zaključci o ispravnosti primjene toplinske obrade u zavarivanju ove vrste čelika, koji se često koristi u industriji za izradu posuda pod tlakom.

## 2. ZAOSTALA NAPREZANJA I DEFORMACIJE U ZAVARENIM SPOJEVIMA

Procesom zavarivanja u materijal se unose neželjena naprezanja, a ponekad se javljaju i deformacije. To se događa zbog unosa energije u materijal, taljenja i solidifikacije metala. U okruženju zavarenog spoja tijekom solidifikacije zavora javljaju se vlačna zaostala naprezanja, posebice u longitudinalnom pravcu. Ta naprezanja utječu na dinamičku čvrstoću i žilavost, posebice ako postoje određena zarezna djelovanja ili nedostaci u području zavora. [1]

U području zavarenog spoja (metal zavora + zona staljivanja + zona utjecaja topline) tijekom zavarivanja pojavljuju se svi strukturni oblici niskolegiranog čelika, kakvi se inače susreću pri promatranju skrućivanja u vremenskom slijedu, jedan nakon drugog. Svaki strukturni oblik čelika je po svom specifičnom volumenu različit od ostalih, pa dolazi do određenih stanja napetosti u ovoj zoni. Slika 1 prikazuje promjene strukture i raspodjele tvrdoće u ZUT-u kod zavarivanja niskolegiranih čelika, a ovisno o raspodjeli temperature i usporedni prikaz u Fe-C dijagramu.



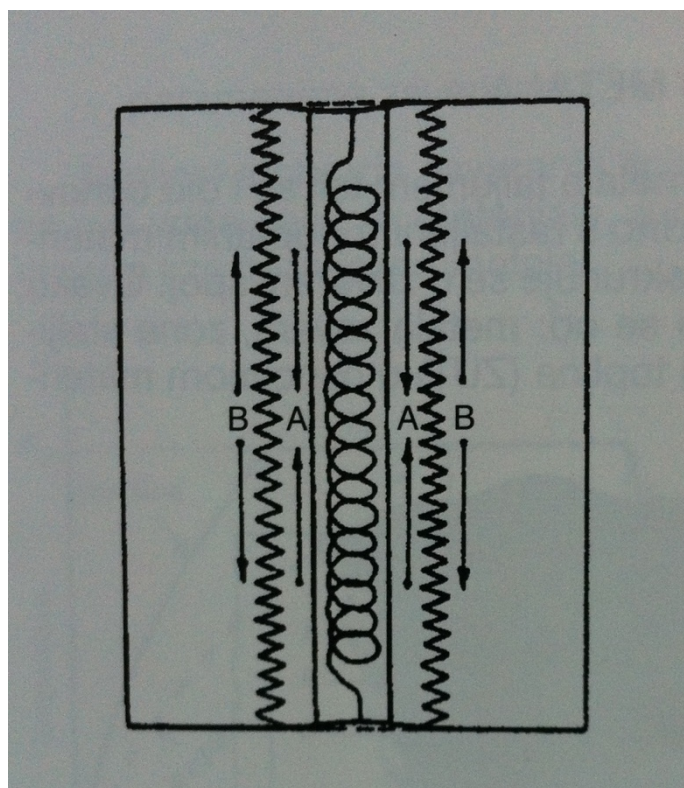
Slika 1. Promjene strukture i raspodjela tvrdoće kod zavarivanja niskolegiranih čelika [2]



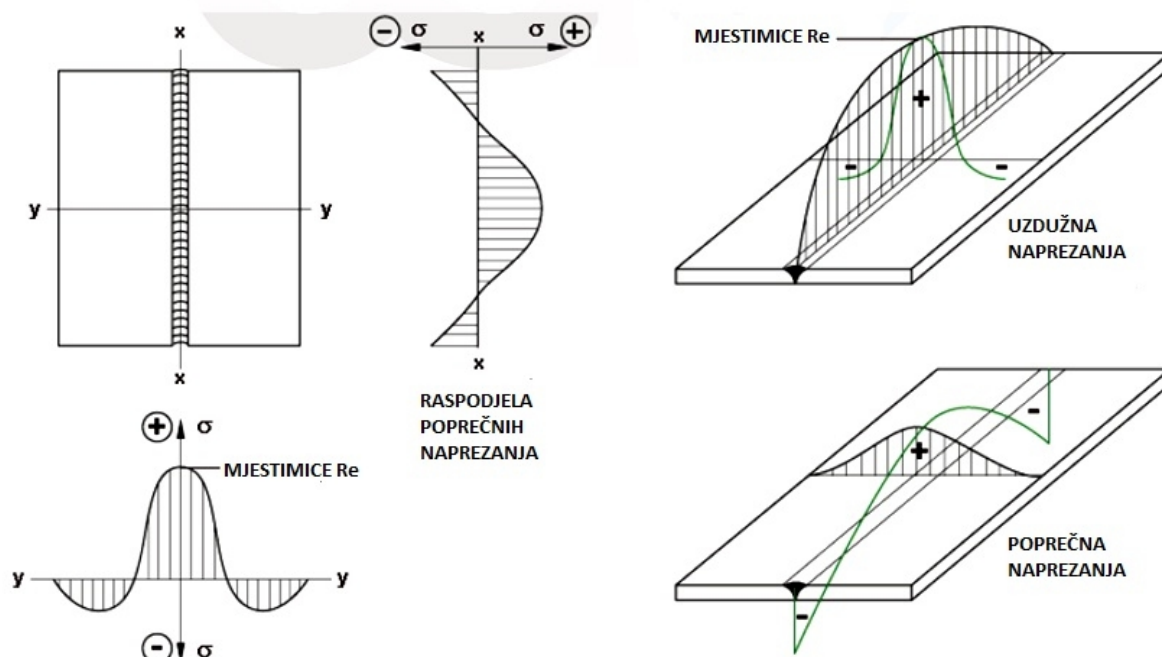
Osim toga, ako se u sastavu čelika nalazi više ugljika ili drugih legiranih elemenata i ukoliko je hlađenje prebrzo, pojavljuje se martenzitna struktura velike tvrdoće i krhkosti, ispod zavora ili uz njega, popraćena visokim napetostima. Rezultat je sklonost pukotinama u zavarenom spoju. Treba napomenuti da je štetno i presporo hlađenje jer ono može uzrokovati pogrubljenje zrna. [2]

Odnos zaostalih napetosti i deformacija u materijalu ovisi o rasporedu skupljanja zavora (simetrični ili nesimetrično), debljini materijala, krutosti konstrukcije. Naime, ukoliko su skupljanja raspoređena simetrično ili je materijal velike debljine ili je konstrukcija vrlo kruta, zaostala naprezanja će biti veća, a deformacije manje. U suprotnom slučaju (manje debljine, nesimetrično skupljanje metala) zaostala naprezanja će biti manja, ali će deformacije biti veće. Razlikujemo reaktivna, toplinska i strukturna naprezanja.

Slika 2 prikazuje pojednostavljeni prikaz naprezanja u zavaru nakon hlađenja. Metal zavora se pokušava skupiti i djeluje kao napeta opruga, dok se okolni materijal tome opire stezanju poput stlačene opruge.



Slika 2. Shematski prikaz naprezanja u zavaru [2]

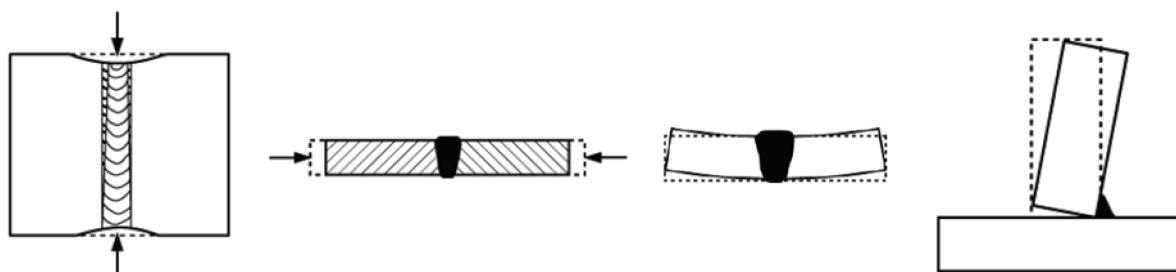


Slika 3. Raspored naprezanja u zavaru [3]

## 2.1. Vrste deformacija u zavarenim spojevima

Kod zavarenih spojeva najčešće nalazimo četiri tipične vrste deformacija. To su (slika 4):

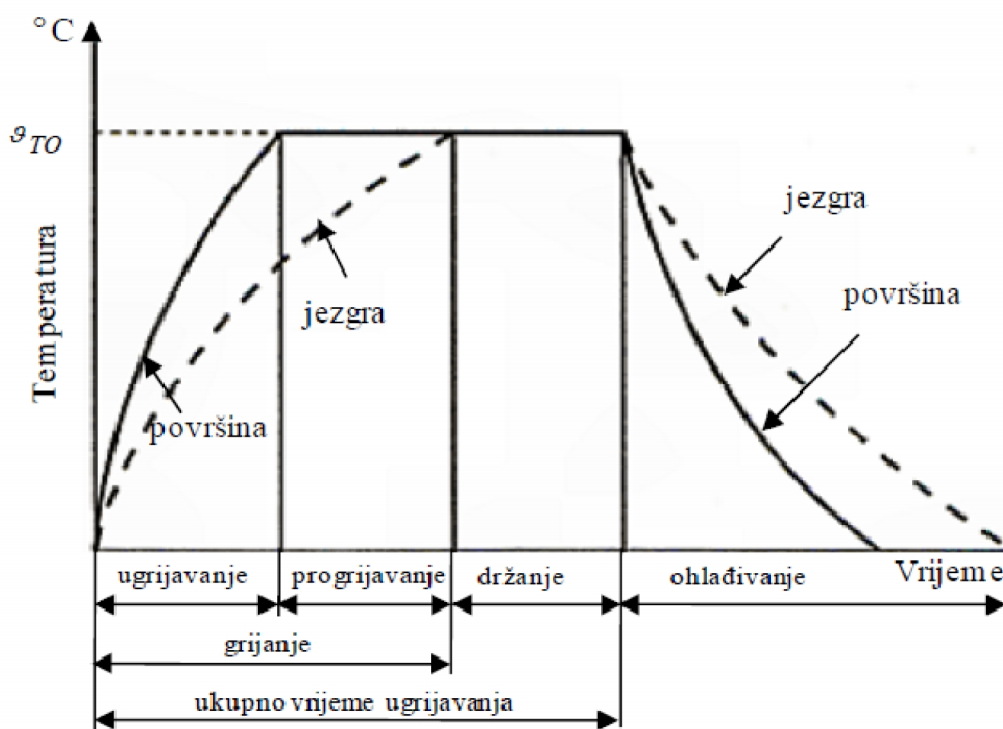
- Skraćenje elementa u uzdužnom smjeru (uzdužna deformacija);
- Skraćenje elementa poprečno na uzdužnu os (poprečna deformacija);
- Iskrivljenje (uzdužna i poprečna deformacija);
- Kutna deformacija (u sučeljenim i kutnim spojevima).



Slika 4. Prikaz vrsti deformacija kod zavarivanja (uzdužna, poprečna, uzdužno-poprečna i kutna deformacija) [3]

### 3. TOPLINSKA OBRADA METALA

Opći postupak svake toplinske obrade može se prikazati dijagramom ovisnosti promjene temperature i vremena. Takav opći dijagram prikazan je na slici 5.



Slika 5. Dijagram postupka toplinske obrade [4]

Svaka faza toplinske obrade važna je za uspješno provođenje kompletnog postupka i za dobivanje željenog rezultata. Posebna se pažnja prilikom grijanja i ohlađivanja mora obratiti na dimenzije predmeta i intenzitet temperaturne promjene. Naime, isprekidane crte na dijagramu predstavljaju zagrijavanje jezgre predmeta. Zagrijavanje i ohlađivanje jezgre bit će tim sporije što su veće dimenzije predmeta te što je veći intenzitet temperaturne promjene.

Važan parametar je i vrijeme držanja na propisanoj temperaturi. Ovisno o vrsti toplinske obrade i željenom rezultatu propisuje se vrijeme držanja.

#### 4. TOPLINSKA OBRADA ZAVARENIH SPOJEVA

Toplinska obrada nakon zavarivanja provodi se s ciljem ponovnog dobivanja mehaničkih svojstava koja su promijenjena kroz zavarivanje. Osnovna zadaća toplinske obrade je smanjenje zaostalih naprezanja i tvrdoće, usitnjavanje zrna, povećanje otpornosti na koroziju (interkristalna korozija CrNi čelika), rekristalizacija zrna, povećanje mehaničkih svojstava, smanjenje sadržaja difundiranog vodika te povećanje dimenzijske stabilnosti zavarenog spoja.[5]

Kao i sve drugi postupci toplinske obrade, i toplinska obrada zavara sastoji se od zagrijavanja na određenu temperaturu, zadržavanje određeno vrijeme na toj temperaturi i od postupnog hlađenja. To je točno definirana promjena temperature u ovisnosti o vremenu. Ukoliko taj kompletni postupak nije propisno proveden te ako nije kontroliran odgovarajućom opremom, mogu se postići sasvim suprotni učinci od željenih, [5]. Toplinska obrada može se provoditi na cijelom radnom komadu ili se može toplinski obraditi samo područje zavarenog spoja.

Glavni parametri toplinske obrade su:

- Temperatura zagrijavanja (progrijavanja);
- Brzina zagrijavanja (progrijavanja) i hlađenja;

Načini zagrijavanja mogu biti različiti: [5]

- Posebne peći;
- Grijaća tijela napajana električnom energijom;
- Otvorenim plinskim plamenom;
- Vrućim zrakom;

Vrste toplinske obrade u zavarivanju su: [5]

- Žarenje u svrhu sniženja naprezanja;
- Normalizacijsko žarenje;
- Poboljšavanje;
- Gašenje nekaljivih legura;
- Kombinirane višekratne toplinske obrade;
- Predgrijavanje (toplinska obrada prije zavarivanja)

## **5. POSTUPAK TOPLINSKE OBRADE ZAVARENIH SPOJEVA PRIJE IZVOĐENJA ZAVARIVANJA**

### **5.1. Predgrijavanje**

Predgrijavanjem se snižavaju temperaturne razlike između zagrijanog i nezagrijanog mjesta u području zavarivanja. Povišenjem temperature materijala smanjuje se brzina odvođenja topline, a time i sklonost otvrdnjavanju u ZUT-u kod pojedinih vrsta čelika. Tako se olakšava zavarivanje metala i legura koje imaju visok koeficijent toplinske vodljivosti, npr. bakar. Predgrijavati se može cijeli radni komad (manji komadi) ili se ono može izvoditi lokalno, na mjestu budućeg zavarivanja. Proces predgrijavanja se ne izvodi uvijek, nego samo onda kada je to propisano. Predgrijavanje se određuje u ovisnosti o materijalu, debljinama materijala, tehničkoj izvedivosti i dr.

Uvjeti predgrijavanja ovise o vrsti materijala, kemijskom sastavu, debljini materijala, načinu odvođenja topline (oblik spoja), temperaturi okoline i o dozvoljenom ukupnom unosu toplinske energije.

Predgrijavanje čelika na relativno niske temperature (200 °C) omogućuje da zona zavarenog spoja ostane duže vrijeme na temperaturama od 550 °C - 650 °C što omogućuje gotovo izotermičku pretvorbu austenita u ferit i perlit te sprječava pojavu martenzita. Najpovoljnije djelovanje predgrijavanja očituje se u sniženju brzine hlađenja u području temperature ispod 300 °C, kada u čeliku nastaje najveći broj pukotina. [2]

Predgrijavanjem se smanjuju zaostala naprezanja nakon zavarivanja jer su skupljanja metala nakon hlađenja manja nego kod hladnog materijala. Uz to predgrijavanje i dogrijavanje olakšavaju izlazak difundiranog vodika iz metalne kristalne rešetke.

### 5.1.1. *Određivanje temperature predgrijavanja*

Primarni utjecajni čimbenik za određivanje temperature predgrijavanja je kemijski sastav čelika. Količina ugljika i ostalih legiranih elemenata ima značajan utjecaj na mehanička svojstva, ali i na zakaljivost i prokaljivost čelika. Pri tome ugljik povisuje zakaljivost, a ostali legirani elementi prokaljivost. U svrhu određivanja kaljivosti čelika, uveden je pojam ekvivalenta ugljika –  $C_{ekv}$ . On se računa pomoću više izraza, međutim najčešće se koristi izraz:

$$C_{ekv} = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (N+Cu)/15. \quad (1)$$

Poznato je da su čelici s povišenim iznosom ekvivalentnog ugljika skloniji zakaljivanju i pukotinama, kod zavarivanja su potrebne više temperature predgrijavanja.

$C_{ekv}$  se koristi za izračune temperatura predgrijavanja kroz razne metode. Najpoznatije su metode *Seferian*, *BWRA*, *Ito* i *Bessyo*.

Te metode pomoću različitih izračuna i tablica služe za određivanje točne ili približne temperature predgrijavanja.

### 5.1.2. *Primjena predgrijavanja ovisno o materijalu [2]*

- Niskolegirani čelici – Predgrijavaju se samo u slučaju velikih debljina ili temperature okoline ispod +5°C.
- Niskolegirani sitnozrnati čelici – Predgrijavaju se ovisno o sastavu čelika. Vrlo su osjetljivi na premali ili preveliki unos topline.
- Niskolegirani Mo, CrMo i CrMoV čelici – Zakaljivi su i skloni pukotinama. CrMo čelike obavezno treba predgrijavati između 200 °C i 300 °C i na malim debljinama. Isto vrijedi i za CrMoV čelike, samo su temperature predgrijavanja malo više (do 350°C).
- Feritni čelici – S visokom sadržajem kroma (15-30 %) i niskim sadržajem nikla i molibdena, te s manje od 0,10 % ugljika zavaruju se uz predgrijavanje i međuslojnu temperaturu od 200 - 300 °C. Posebna pažnja potrebna za unos topline (<12 kJ/cm)
- Austenitni CrNi i CrNiMo čelici – Ne predgrijavaju se kod zavarivanja, ali se pozornost mora obratiti na unos topline (<15 kJ/cm)
- Austenitni manganski čelici – Ne predgrijavaju se, nego se, naprotiv, gasi polijevanjem vodom.

- Raznorodni čelici – Kod zavarivanja npr. visokolegiranog CrNi čelika s niskolegiranim CrMo čelikom jedan je sklon pukotinama, a kod drugog predgrijavanje treba izbjegavati. Obično se problem tada rješava navarivanjem odgovarajućeg prijelaznog sloja na niskolegirani čelik uz predgrijavanje. Potom se zavarivanje izvodi bez predgrijavanja.
- Aluminij i legure – Predgrijavaju se s ciljem poboljšavanja mogućnosti zavarivanja. Za aluminij temperatura predgrijavanja iznosi oko 300 °C, a za Al-legure od 150 °C do 250 °C. Kod MIG zavarivanja ponekad predgrijavanje nije potrebno kod rada s višim iznosima struje ili kod zavarivanja tanjih materijala.
- Bakar i legure – Predgrijavaju se zbog poboljšanja mogućnosti zavarivanja. Temperatura predgrijavanja iznosi 100 °C po mm debljine materijala, ne više od 600 °C. Legure se predgrijavaju na 200 – 400 °C. Tanji materijali se obično ne predgrijavaju.

#### **5.1.3. Praktične smjernice za predgrijavanje kod zavarivanja [6]**

- Predgrijavanje se provodi u zoni uz pripremljeni spoj. Širina zone predgrijavanja iznosi oko 10 debljina materijala, sa svake strane spoja, ne više od 250 mm.
- Mjerenje temperature predgrijavanja je obavezno. Najčešće se to radi pomoću termometra ili termokrede, a kontrola se vrši i sa suprotne strane mjesta zagrijavanja.
- Predgrijavanje ne smije biti prebrzo, jer može uzrokovati deformacije i lomove prirodnih dijelova, ali i presporo je loše zbog loše ekonomičnosti.
- Predgrijavanje se mora izvoditi i kod izrade pripoja i privarivanja raznih pomagala. Predgrijava se lokalno na mjestu pripoja.
- Za vrijeme zavarivanja kontrolira se međuslojna temperatura koja ne smije odstupati od zahtijevane za više od +/- 20 °C.
- Predgrijavanje se može izvesti plinskim plamenom, elektrootporno ili indukcijski. Ako se izvodi plinski preporučuju se plinovi propan-butan, zemni plin uz stlačeni zrak ili samo plin. Ne preporuča se predgrijavanje acetilenom i kisikom.
- U situacijama kad se ne predviđa predgrijavanje preporuča se lagano zagrijavanje radnog komada plamenikom, radi uklanjanja kondenzirane vlage s površine.

## 6. POSTUPCI TOPLINSKE OBRADE ZAVARENIH SPOJEVA NAKON IZVOĐENJA ZAVARIVANJA

U praksi najčešće korišten postupak toplinske obrade nakon zavarivanja je žarenje za redukciju zaostalih naprezanja. Ostale toplinske obrade kao što su normalizacijsko žarenje, poboljšavanje, popuštanje, gašenje, pa čak i kaljenje znatno su kompliciranije i manje se primjenjuju u uobičajenom svakodnevnom zavarivanju.

### 6.1. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja

Žarenje za sniženje zaostalih naprezanja u zavarenom spoju čeličnih proizvoda je postupak grijanja radnog komada na temperaturu ispod temperature početka strukturnih promjena (ispod  $A_{c1}$ ) u područje između 550 °C i 650 °C. Na toj se temperaturi zavareni spoj ili cijeli radni komad drži određeni vremenski interval. Nakon držanja, zavareni spoj se kontrolirano i postepeno hladi na temperaturu do 200 °C. Postupak je moguće izvoditi lokalno, zagrijavajući samo područje zavarenog spoja, ili zagrijavanjem cijelog radnog komada. Pri lokalnom zagrijavanju zavarenog spoja treba paziti na problem eventualnog unošenja novih naprezanja. To se može dogoditi ukoliko se žarenje ne izvodi prema određenom planu. Kod lokalnog zagrijavanja važno je da radni komad ima mogućnost širenja i skupljanja. Proizvođači čelika, limova i cijevi, odgovarajući nacionalni standardi i propisi o gradnji pojedinih proizvoda propisuju podatke za žarenje pojedinih vrsta čelika, a primjer je dan u tablici 1.

Tablica 1. Uvjeti žarenja za redukciju zaostalih naprezanja čelika za kotlogradnju [5]

Čelik	Temperatura žarenja, °C
0,5Mo	660-700
1Cr0,5Mo	730-770
2,25Cr1Mo	730-780

Mehanizam djelovanja žarenja na redukciju zaostalih naprezanja je relativno jednostavan. Naime, pri povišenim temperaturama snizuje se granica razvlačenja čelika, a u tako plastičnom stanju materijala dobrim dijelom nestaju naprezanja nastala zavarivanjem. Ipak, naprezanja ne nestaju u potpunosti jer se snižavaju samo do iznosa granice razvlačenja pri primjenjenoj temperaturi žarenja.



Proces žarenja dijeli se u tri faze (slika 6): grijanje, držanje na temperaturi žarenja i hlađenje. Grijanje se sastoji od zagrijavanja i progrijavanja. U prvoj se fazi radni komad postupno, kontrolirano, zagrijava do temperature žarenja. U drugoj fazi radni se komad određeno vrijeme zadržava na propisanoj temperaturi te se time materijal dovodi u stanje plastičnosti pri čemu zaostalo naprezanje u dobroj mjeri nestaje. Treća faza je kontrolirano hlađenje po cijelom presjeku. Naglo ili lokalno hlađenje u radni komad može unijeti dodatna naprezanja, te tako izazvati kontraproduktivni efekt.

Brzina ugrijavanja radnog komada se obično računa preko izraza:

$$v_p = \frac{5000}{\text{min.debljina(mm)}} \quad [^{\circ}\text{C/h}] \quad (2)$$

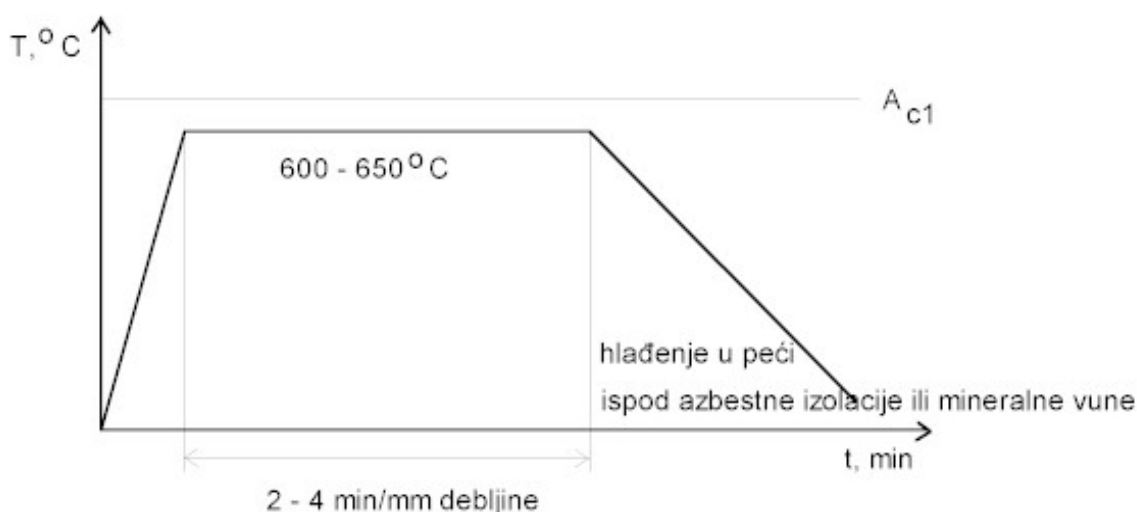
Bez obzira na izračunate vrijednosti, brzina ugrijavanja mora biti u intervalu od 50  $^{\circ}\text{C/h}$  do 250  $^{\circ}\text{C/h}$ . Brzina hlađenja određuje se sličnim izrazom, s razlikom što je u brojniku 6500:

$$v_h = \frac{6500}{\text{min.debljina(mm)}} \quad [^{\circ}\text{C/h}] \quad (3)$$

Gdje je:

$v_p$  - brzina ugrijavanja,  $^{\circ}\text{C/h}$

$v_h$  - brzina hlađenja,  $^{\circ}\text{C/h}$ .



Slika 6. Dijagram žarenja za redukciju zaostalih naprezanja [7]

Vrijeme držanja na temperaturi žarenja ovisi o visini temperature žarenja. Tako pri temperaturi od 600 °C vrijeme držanja iznosi oko 2 min/mm do 2,5 min/mm debljine materijala. Kod nižih temperatura žarenja to je vrijeme znatno duže. Prevelika brzina zagrijavanja ili hlađenja uvjetuje velike razlike u progrijanosti radnog komada, te samim time uzrokuje naprezanja i deformacije.

Propisi o gradnji pojedinih proizvoda određuju u kojim se slučajevima provodi toplinska obrada žarenja. Ono se uglavnom provodi za debljine materijala iznad 30 mm, ali i kod znatno tanjih kada se radi o čelicima sklonim otvrdnjavanju i pukotinama kod zavarivanja. U tim slučajevima je ovo žarenje istodobno i popuštanje jer se njime odstranjuje eventualno nastali martenzit.

Ova vrsta žarenja, osim smanjenja zaostalih naprezanja ima i neke druge povoljne utjecaje na zavareni spoj:

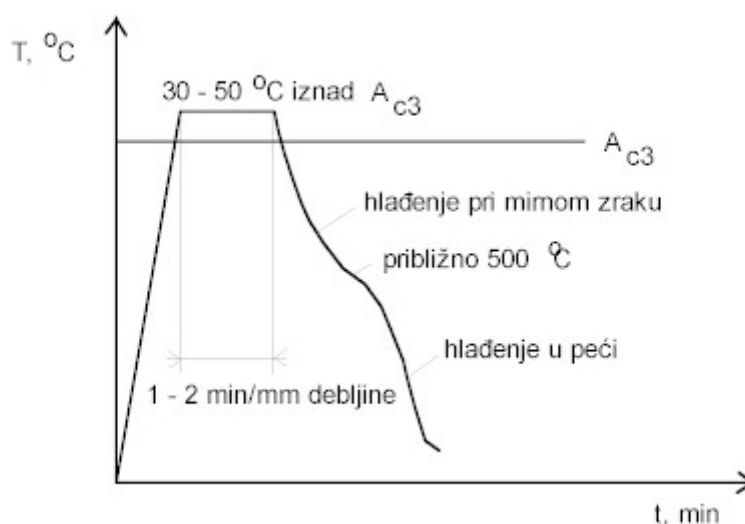
- Sniženje tvrdoće u ZUT-u;
- Izlazak vodika iz zavarenog spoja;
- Rekristalizacija osnovnom materijala izvan zone zavarenog spoja, u slučaju da je bio hladno oblikovan;
- Umirenost konstrukcije (stabilnost oblika i dimenzija) u slučaju potrebne strojne obrade nakon zavarivanja.

Ovisno o vrsti čelika, ovo žarenje može imati različit utjecaj na količinu uklonjenih naprezanja. Tako primjerice niskolegirani čelici s Ni, Mn ili Cr nakon žarenja imaju zaostala naprezanja svedena na vrlo nisku razinu, dok čelici legirani s Mo ili Mo+V mogu zadržati relativno visoku količinu zaostalih naprezanja nakon žarenja. Razlog tome je što molibden i vanadij značajno utječu na vlačnu čvrstoću pripovišenim temperaturama (povisuju ju).

## 6.2. Normalizacijsko žarenje

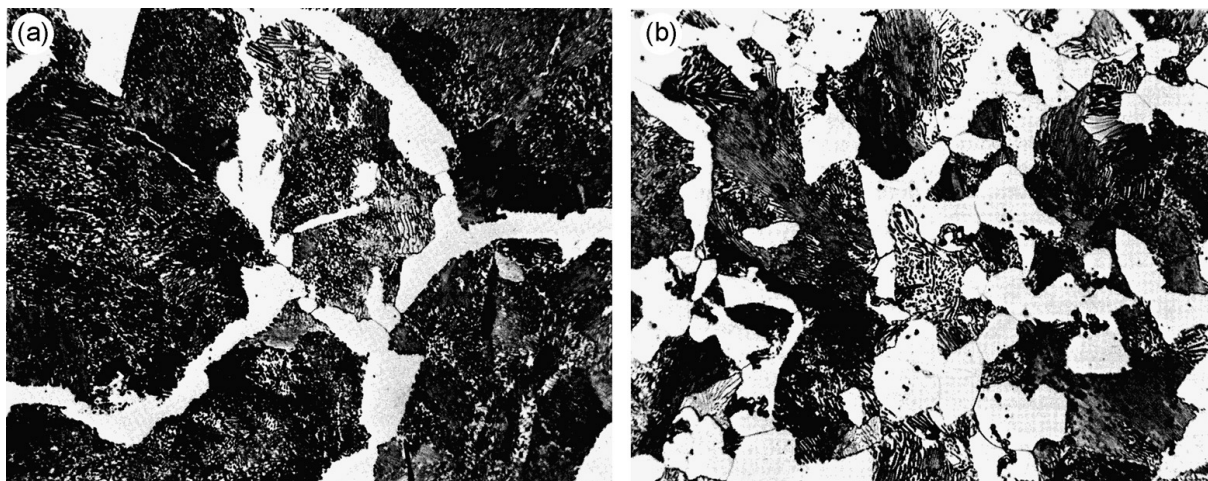
Normalizacijsko žarenje primjenjuje se u svrhu usitnjenja grubozrnate strukture zavara, tako da se zavarenom spoju vrati kvaliteta (mehanička svojstva) osnovnog materijala, npr. kod zavarivanja pod troškom (EPT). Normalizacijom se usitnjava zrna, a istodobno se smanjuju i zaostala naprezanja. Ovoj operaciji toplinske obrade podvrgavaju se nelegirani i niskolegirani čelici koji su prethodno hladno deformirani za više od 5 %. [8]

Normalizacija (slika 7) se provodi zagrijavanjem radnog komada na temperaturu 30 – 50 °C višu od temperature  $A_{c3}$  (temperatura austenitizacije), držanjem na toj temperaturi što kraće, tek toliko da se jednoliko proгриje, te hlađenjem na mirnom zraku i/ili u peći, s ciljem dobivanja feritno-perlitne strukture.



Slika 7. Dijagram normalizacijskog žarenja [7]

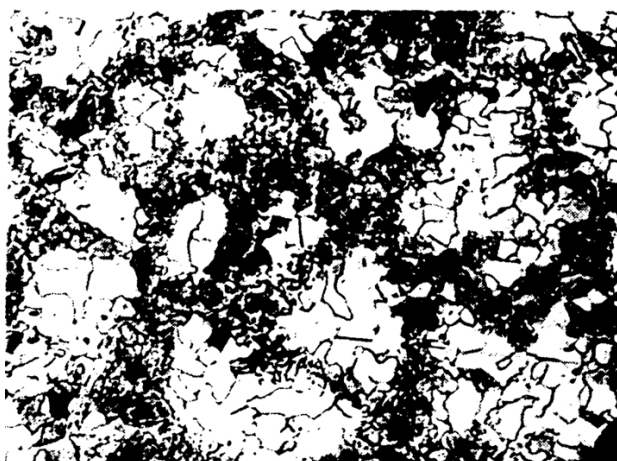
Na visokoj temperaturi normalizacije čvrstoća materijala pada do te mjere da radni komad zbog vlastite težine može značajno promijeniti oblik (deformirati se), tako da više ne odgovara namjeni. Učvršćivanje zbog sprječavanja ovih deformacija znatno poskupljuje toplinsku obradu, pa se zbog složenosti i neekonomičnosti ova toplinska obrada nastoji izbjeći u slučajevima kada nije neophodna.



Slika 8. Usitnjenje zrna normalizacijom kod ugljičnog čelika sa 0,5 % ugljika [9]

Na slici broj 8 prikazan je efekt normalizacijskog žarenja na ugljični čelik sa 0,5 % ugljika. Vidljivo je značajno usitnjenje zrna i homogenizacija strukture. Ovo značajno pridonosi poboljšanju mehaničkih svojstava tog čelika, a pridonosi i boljoj obradivosti u daljnjoj eventualnoj strojnoj obradi.

Kod čelika sa masenim udjelom ugljika između 0,35 % i 0,55 % potrebno je obratiti pažnju na brzinu hlađenja između temperatura  $A_{r3}$  i  $A_{r1}$ . To su temperature pri kojima počinje ( $A_{r3}$ ) i završava ( $A_{r1}$ ) transformacija austenita u ferit. Problem je u različitim temperaturama početka precipitacije ferita i perlita. Precipitacija ferita se smanjenjem brzine hlađenja povećava uz granice austenitnog zrna, pa je potrebno ostvariti simultano formiranje zrna ferita i perlita. Na slici 9 je prikazan slučaj stvorene nejednolike distribucije ferita.



Slika 9. Nejednolik raspored ferita i perlita zbog presporog hlađenja u području precipitacije ferita (između temperatura  $A_{r3}$  i  $A_{r1}$ ) [9]

S druge strane, prebrzo ohlađivanje u istom tom temperaturnom rasponu uvjetuje nastajanje igličastog ferita formiranog po granicama austenitnog zrna. Takva se struktura naziva još i *Widmannstättenova struktura*, a prikazana je na slici 10. Formacija perlita slijedi tek nakon kompletne precipitacije ferita.

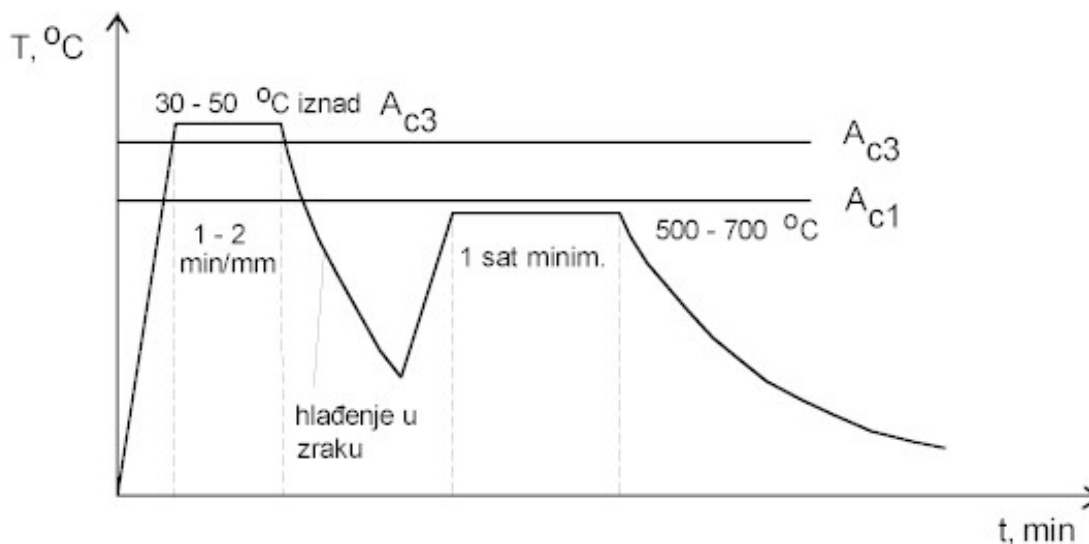


Slika 10. Formirani igličasti ferit (Widmannstättenova struktura) uslijed prebrzog ohlađivanja u području precipitacije ferita (između temperatura  $A_{r3}$  i  $A_{r1}$ ) [9]

### 6.3. Poboljšavanje

Toplinska obrada poboljšavanja (slika 11) primjenjuje se u slučajevima kad se pri zavarivanju promijene svojstva ranije poboljšanog čelika. Poboljšavanje je zapravo kombinacija dvije zasebne vrste toplinske obrade, kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja.

Najprije se vrši zagrijavanje na temperaturu austenitizacije, isto kao i kod normalizacije. Nakon toga se vrši naglo hlađenje u vodi ili u ulju – kaljenje. Nakon toga se radni komad ponovo zagrijava, međutim sada do temperature popuštanja. Za visokotemperaturno popuštanje te temperature poprimaju iznose nešto manje od temperature  $A_{c1}$ . Nakon zagrijavanja i držanja od minimalno jednog sata, primjenjuje se sporo ohlađivanje da ne dođe do dodatnog unosa naprezanja. Sporo hlađenje dopušta se za nelegirane i čelike legirane s Mo. Kod ostalih čelika postoji opasnost od pojave krhkosti popuštanja.

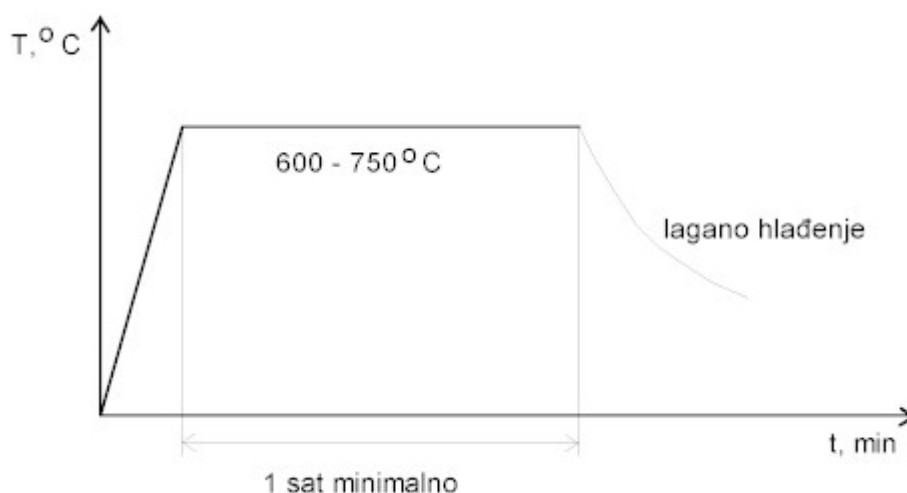


Slika 11. Dijagram poboljšavanja zavarenog spoja [7]

Ova se toplinska obrada, zbog svoje složenosti, manje primjenjuje. Kod žarenja radnog komada radi smanjenja zaostalih naprezanja, temperatura žarenja ne smije biti viša od temperature popuštanja poboljšanog čelika.

#### 6.4. Toplinska obrada sniženja tvrdoće

Toplinska obrada sniženja tvrdoće (slika 12) primjenjuje se kod zavarivanja zakaljivih niskolegiranih čelika, npr. CrMo ili CrMoV čelika. Zagrijavanje za popuštanje izvodi se na temperaturi ispod  $A_{c1}$  u području 600 – 780 °C, ovisno o vrsti čelika.



Slika 12. Dijagram snižavanja tvrdoće (popuštanja) [7]

Ova se obrada obično izvodi u nastavku dogrijavanja i nakon završenog zavarivanja, bez međuhlađenja. Zakaljene zone popuštanjem stvaraju strukturu raspadnutog martenzita, koja je žilavija, rastezljivija, ali ima manju čvrstoću i tvrdoću.

Tablica 2 prikazuje preporučene temperature toplinske obrade za smanjenje tvrdoće za dvije vrste čelika koji se mogu podvrgnuti ovoj toplinskoj obradi.

Tablica 2. Preporučene temperature za snižavanje tvrdoće [2]

Čelik	Temperatura popuštanja, °C
Ugljični sa 1%Cr i 0,5% Mo	730 – 770
Ugljični sa 2,25% Cr i 1% Mo	730 - 780

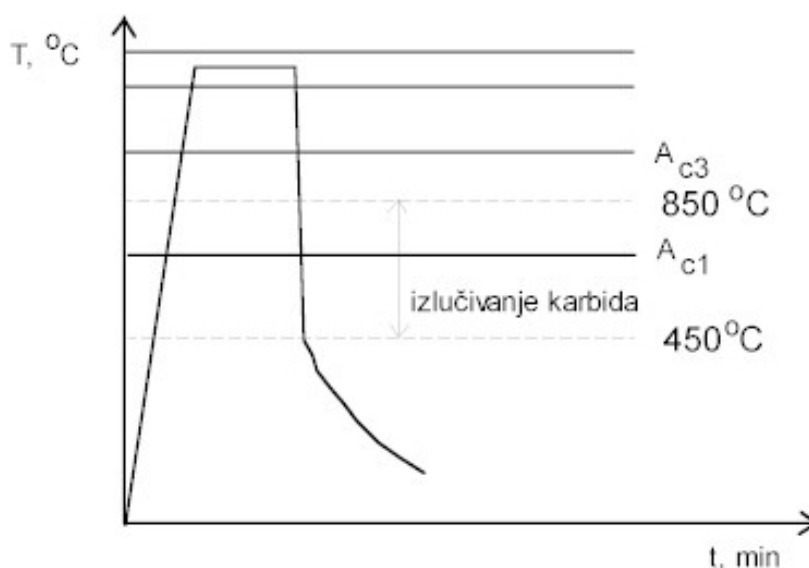
Vrijeme držanja na određenoj temperaturi iznosi minimalno jedan sat i to nakon progrijavanja.

### 6.5. Gašenje

Toplinska obrada gašenja (slika 13) primjenjuje se kod zavarenih proizvoda od austenitnih CrNi i CrMn čelika koji nisu stabilizirani i kod kojih je zbog zavarivanja došlo do izlučivanja kromovih karbida na granicama zrna. Radni komad se zagrijava na temperaturu 1000 – 1100 °C, a zatim se izvodi naglo hlađenje u vodi. Na visokoj temperaturi dolazi do raspada karbida i povratka Cr u zone u okolini granice zrna, pa je krom relativno jednolično raspoređen u materijalu. Kada se na tako visokoj temperaturi postigne otapanje karbida, nužno je takvu strukturu brzo hladiti, posebno u području 850 – 450 °C, kada je izlučivanje karbida najintenzivnije.

Ovaj postupak je u principu identičan postupku kaljenja, ali se ne postižu isti učinci, jer se radi o drugačijem materijalu.

Toplinska obrada gašenja je skupa zbog potrebe zagrijavanja radnih komada na vrlo visoke temperature te njena primjena nije česta u svakodnevnom zavarivanju. Umjesto toga više se pažnje nastoji posvetiti načinu zavarivanja, tj. unosu topline u CrNi čelik. Ukoliko je zavarivanje pravilno izvedeno, neće doći do značajnijeg izlučivanja karbida. Druga opcija je odabir stabiliziranih CrNi čelika.



Slika 13. Dijagram gašenja CrNi i CrMn čelika [7]



## 6.6. Kaljenje

Ova se toplinska obrada koristi za podeutektoidne čelike, a sastoji se od:

- Zagrijavanja radnog komada na temperaturu 30°C do 70°C iznad  $A_{c3}$ ;
- Držanja na temperaturi austenitizacije s ciljem otapanja ugljika i legirajućih elemenata u austenitu;
- Naglog hlađenja u svrhu postizanja martenzitne mikrostrukture (dijagram toplinske obrade jednak je gašenju iz poglavlja 6.4.).

Ova se obrada najčešće primjenjuje kod reparaturnog zavarivanja ili navarivanja alata. Svi alatni čelici su nepovoljni za zavarivanje. Skloni su pukotinama pa ih je uvijek potrebno predgrijavati na vrlo visoke temperature. Budući su zakaljeni, postupkom mekog žarenja može se znatno smanjiti opasnost od nastajanja pukotina.

Dva su osnovna načina reparaturnog navarivanja alata. Jedan je način dugotrajniji i skuplji, ali pouzdaniji, a drugi je kraći i jeftiniji, ali manje pouzdan. Prvi se način (skuplji i sigurniji sa stajališta nastanka pukotina) sastoji od sljedećih koraka: [8]

1. Meko žarenje radnog komada
2. Obrada za pripremu mjesta zavarivanja
3. Predgrijavanje
4. Navarivanje
5. Meko žarenje nakon navarivanja
6. Mehanička obrada navarenog mjesta
7. Kaljenje i popuštanje

Drugi način je kraći i jeftiniji, a sastoji se od: [8]

1. Obrada za pripremu mjesta zavarivanja
2. Predgrijavanje
3. Navarivanje, a time i kaljenje dodatnog materijala
4. Popuštanje
5. Eventualna mehanička obrada brušenjem

Osnovni se materijal kali sa svoje temperature kaljenja, a dodatni se kali s temperature taljenja. Ako je dodatni materijal legiran, onda se takvo kaljenje može smatrati dovoljno kvalitetnim. [8]

## **7. PRINCIPI RADA I OPREMA ZA TOPLINSKI OBRADU U ZAVARIVANJU**

Svaka proizvodnja koja u proizvodnom programu ima zavarivanje niskolegiranih i visokolegiranih čelika i drugih metala, manje ili više, ima potrebu za toplinskom obradom svog proizvoda. To je posebno važno za montažere energetskih, kemijskih, petrokemijskih i drugih postrojenja.

Plan i zahtjevi na toplinsku obradu pojedinih materijala i konstrukcija, kao i odgovarajuća dokumentacija, moraju biti jasno definirani propisima za gradnju pojedinih proizvoda. Izvršenje kontroliraju nadzorni organi proizvodnje.

Jasno je da ne može svaka tvornica imati peć za žarenje jer je ona vrlo skupa i, najčešće, nerentabilna investicija. Skup je i transport proizvoda do mjesta gdje postoje takve peći, a ponekad su problem dimenzije dijelova jer ne stanu ili nisu za odžarivanje u peći.

U ovom poglavlju cilj je prikazati principe rada i opremu za toplinsku obradu, prvenstveno suvremena i provjerena rješenja u tom području.

### **7.1. Osnovni zahtjevi opreme za toplinsku obradu**

Osnovni zahtjevi koji se postavljaju na opremu za toplinsku obradu zavarenih spojeva su [10]:

- Mogućnost vrlo fine regulacije grijanja i hlađenja;
- Mogućnost stalne kontrole temperature radnog komada;
- Mogućnost snimanja (ispisivanja) režima grijanja i hlađenja (dokumentiranje);
- Odgovarajući oblici i dimenzije opreme u odnosu na radne komade;
- Ekonomičnost opreme.

Neispunjenje navedenih zahtjeva može za posljedicu imati značajne posljedice. Loše izvedena toplinska obrada ne samo da neće unaprijediti svojstva zavarenog spoja, nego ih može značajno narušiti. To nadalje može izazvati velike probleme u eksploataciji ili financijske gubitke zbog potrebe za izradom novih dijelova, te reparacijom i ponovnom toplinskom obradom već toplinski obrađenih komada.

## 7.2. Peći za toplinsku obradu

Peć za toplinsku obradu ili žarenje zatvoren je prostor u kojem se cijeli objekt ili radni komad kontrolirano zagrijava i hladi, odnosno žari. Izvedbe mogu biti zidane, obložene šamotom ili od čelične konstrukcije obložene izolacijskim materijalom, u cijelom komadu ili od montažnih dijelova. Grijanje u pećima najčešće je izvedeno pomoću elektrootporni grijaćih tijela ili plinskim plamenom. Obično se ove peći grade u velikim dimenzijama, a samim time i skupe, jer je teško predvidjeti veličine objekata koji će se u njoj žariti. [11]

Opće je prihvaćeno da je toplinska obrada cijelog radnog komada u peći za toplinsku obradu bolje rješenje od lokalne toplinske obrade područja zavarenog spoja. Ponekad je u propisima eksplicitno navedeno da se zahtjeva žarenje cijelog radnog komada.

Efekt žarenja u peći može se postići posebnim oblaganjem i stvaranjem uvjeta kao da se žari u peći. To je skuplje nego obrada u pećima, ali je jeftinije od njene gradnje, pa ako se zna da peć neće biti dovoljno iskorištena, poželjniji je način oblaganja komada i žarenja bez peći.

Na slici 14 prikazan je jedan primjer stabilne peći za toplinsku obradu. Stabilne peći su peći dimenzija prilagođenih tipskom objektu. Kod npr. rezervoara i kotlova kao izvor energije koristi se plin, električna energija ili tekuće gorivo. Peć se poslužuje kranskom dizalicom ili transportnim trakama. Za pojedinačne objekte raznih dimenzija projektiraju se i montažne peći takvih dimenzija.



Slika 14. Izvedba stabilne peći za toplinsku obradu [10]

### 7.3. Predgrijavanje i žarenje plinskim plamenom

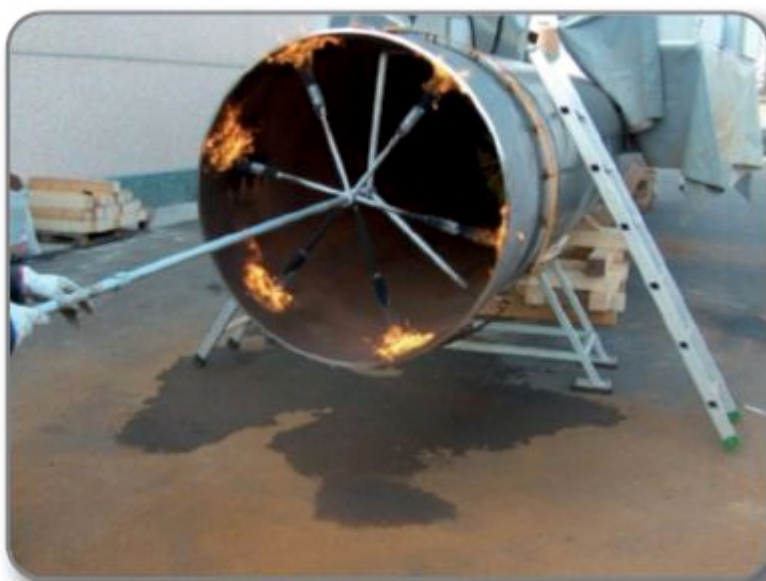
Zagrijavanje otvorenim plamenom (slika 15) spada u stariji industrijski način zagrijavanja metala. Najčešće se primjenjuje za predgrijavanje kod zavarivanja, ali i za lokalno žarenje zavarenog spoja, primjerice kod zavarivanja cijevi. Dobre stvari kod ove vrste zagrijavanja su jednostavna priprema i jeftina oprema. Plamen se dobiva izgaranjem gorivog plina (acetilen u kisiku, propan-butan u komprimiranom zraku, zemni plin u komprimiranom zraku, itd.).

Plamenici se sastoje od kućišta, te jedne ili više sapnica. Toplinski učinak ovisi o broju i veličini sapnica, protoku plina i ogrjevnoj vrijednosti gorivog plina. Plamenici se izrađuju prema potrebi u različitim oblicima:

- Dužinski s jednim ili više redova sapnica;
- Prstenasti koji mogu obuhvatiti cijeli radni komad;
- Poluprstenasti;
- Drugi oblici ovisno o konkretnoj primjeni.

Suvremeni plamenici konstruirani su na principu montažnih jedinica.

Rukovanje plamenicima je jednostavno. Najprije se pušta gorivi plin, a plamen se podešava dodavanjem ili oduzimanjem protoka zraka, odnosno kisika.



Slika 15. Toplinska obrada cijevi plinskim plamenom [12]

#### 7.4. Elektrootporno predgrijavanje i žarenje

Toplina potrebna za provođenje toplinske obrade može se proizvesti na izravan ili neizravan način. Kod neizravnog elektrootpornog zagrijavanja toplina se razvija u grijaćem tijelu koje se postavlja oko radnog komada ili zavarenog spoja i s grijaćeg tijela se toplina prenosi isijavanjem. Električna struja koja se koristi za zagrijavanje može biti istosmjerna ili izmjenična (50Hz). Napon obično varira između 30 V i 70 V. Jakost struje kreće se između nekoliko desetaka do nekoliko stotina ampera.

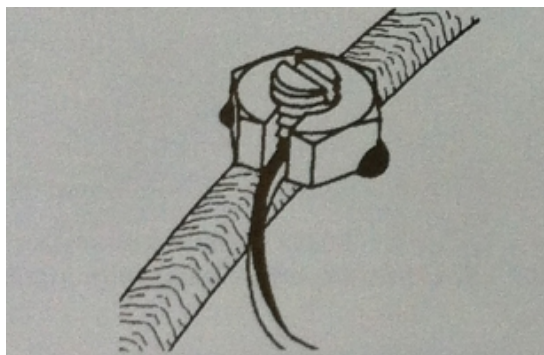
Kod toplinske obrade izvan peći potrebno je odrediti veličinu učinka. To se najčešće provodi iskustveno zbog niza okolnosti koje mogu utjecati na učinak, primjerice: konfiguracija radnog komada, različita zadebljanja, propuh u cijevi, kvaliteta izolacije i dr. U većini slučajeva je dovoljno od 6-8 W/cm<sup>2</sup> zagrijavane površine. Izolacija se provodi oblaganjem radnog komada u nekoliko slojeva posebno prilagodljivim izolacijskim materijalima. Isplati se posvetiti posebna pažnja dobroj izolaciji, jer se uštedi na energiji i vremenu zagrijavanja.

Uređaj za izvođenje zagrijavanja mora biti opremljen termoregulatorom s termoparovima za regulaciju procesa grijanja i hlađenja, kao i pisačima dijagrama temperature toplinske obrade.

Sastavni dijelovi sustava za elektrootporno zagrijavanje su:

- Izvor električne struje
- Upravljački uređaj s pisačima i termoparovima
- Grijaća tijela različitih oblika

Za manje složene obrade, oprema može biti jednostavnija i jeftinija, dok je za zahtjevnije obrade potrebna robusna i pouzdana oprema. Za postavljanje termoparova mogu se koristiti specijalne matice, kako je prikazano na slici 16.



Slika 16. Matica za učvršćivanje termoparova na zavar [11]

U praksi se mogu pronaći kompletni, potpuno automatizirani uređaji za toplinsku obradu snage 10-200 kW, za priključenje na mrežu ili posebni uređaji s agregatom ako nema izvora električne energije u blizini.

Zbog ubrzavanja pripreme za toplinsku obradu radnog komada izrađuju se grijaća tijela različitih oblika, a u svima je žica od vatrootpornog materijala koja se zagrijava i s koje se toplina prenosi na radni komad. Na žicu su navedeni izolacijski materijali kao što su perle ili pločice od vatrootpornih minerala.

Da bi se mogli upotrebljavati, žica i izolacija moraju zadovoljavati ove uvjete:

- Čvrstoća mora biti nekoliko puta veća od čvrstoće porculana
- Tvrdća jednaka tvrdoći stakla
- Toplinska vodljivost znatno veća nego kod porculana
- Otpor električne izolacije velik i kod temperatura iznad 1000°C
- Materijal kemijski inertan i kod povišenih temperatura
- Žica dobre savitljivosti i nakon više desetaka ciklusa zagrijavanja i ohlađivanja

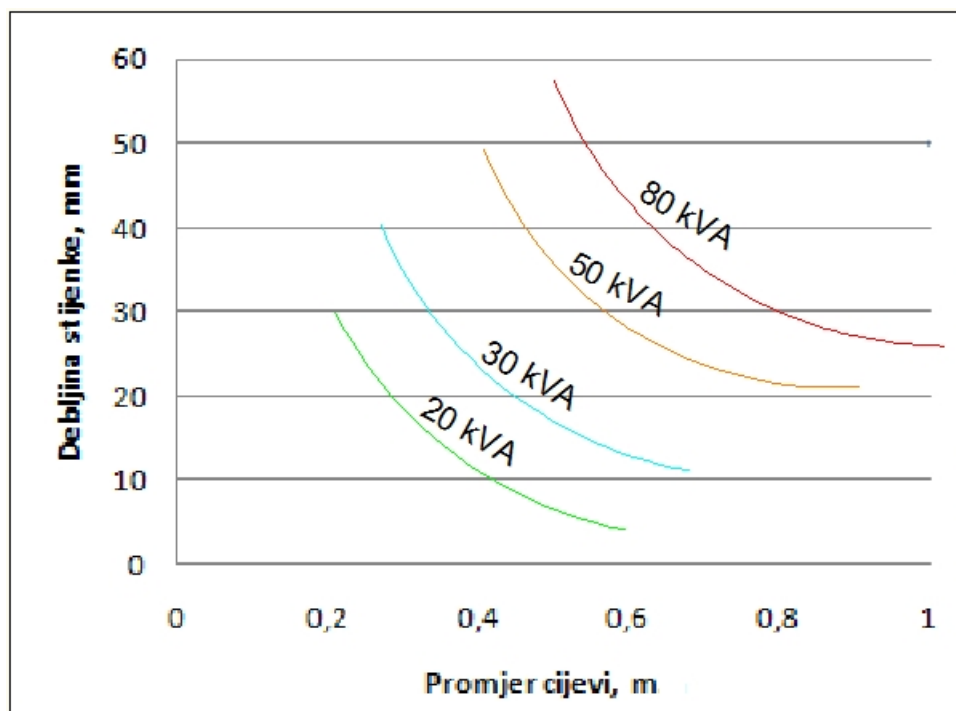
Priprema za izvođenje ove vrste toplinske obrade izvodi se u nekoliko koraka. Prvo se na spoj namjesti grijač i zakopča se brzom prilagodljivom spojnicom. Nakon toga se izvodi spajanje s izvorom struje brzim spojkama i spajanje termoelementa s regulacijskim ormarom. Uređaj se tada programira te se pušta u rad. [11]

### 7.5. Indukcijsko predgrijavanje i žarenje

Indukcijsko zagrijavanje radnog komada radi predgrijavanja i žarenja bazira se na principu rada transformatora. U električki vodljivim materijalima, koji se nalaze u izmjeničnom magnetnom polju, inducira se napon. Taj napon, ako je strujni krug zatvoren, inducira električnu vrtložnu struju. Njena veličina direktno ovisi o iznosu inducirano napona. Inducirana struja protiče kroz vodič i zagrijava ga prema Jouleovom zakonu o utrošenoj snazi ( $P = I^2 \cdot R$ ).

Kada treba zagrijati zavareni spoj na cijevi ili cilindričnom plaštu, oko zavarenog spoja namota se odgovarajući kabel. Kabel predstavlja primarni namot transformatora, a cijev čini kratkospojeni sekundarni svitak. Primarni svitak, zbog proizvedene toline, mora biti toplinski i električno izoliran od sekundarnog. Odgovarajućim dimenzioniranjem izvora izmjenične struje i kabela te prikladnim izborom frekvencije, mogu se postići temperature potrebne za predgrijavanje ili žarenje radnog komada.

Indukcijsko žarenje je vrlo pogodno za komade sa velikom debljinom stijenke, jer se tada teško koristi elektrootporno zagrijavanje. Na slici 17 prikazane su, eksperimentalno provjerene, vrijednosti učinka za različite promjere cijevi i debljine stijenke, koje vrijede za temperature do 760 °C. Frekvencija uređaja korištenog u tom eksperimentu bila je 10 kHz.



Slika 17. Krivulje potrebnog učinka u ovisnosti o dimenzijama cijevi [11]

Toplinska izolacija od azbestnog platna danas je zabranjena, pa se suvremene izolacije rade od platna bez azbesta, koji također mogu izdržati visoke temperature. S vanjske strane, a kod većih promjera cijevi i s unutarnje strane, postavljaju se izolacijski materijali, jastuci, koji sprječavaju hlađenje mjesta zagrijavanja te osiguravaju jednoličnu temperaturu žarenja.

Uređaji za indukcijsku toplinsku obradu (slika 18) mogu biti konstruirani kao jedna cjelina ili od više dijelova, što je prikladnije za terenski rad. Sastoje se od pretvarača za priključak na električnu mrežu, mjernih i regulacijskih instrumenata, višebojnih pisača, signalizacijskih elemenata i dijelova za hlađenje kablova. Kablovi su izvedeni kao bakrena pletenica, višestruko opletena izolirajućim omotačem, a kroz sredinu su hlađeni vodom, koju tjera pumpa tlakom 3-4 bar. Kabel se omata u navojima jedan do drugog u potrebnoj širini, na, izolirajućem platnom, izolirani radni komad. Broj navoja ovog svitka je promjenjiv i ovisi o promjeru i debljini stijenke cijevi. [11]



Slika 18. Uređaj za indukcijsko zagrijavanje cijevi [13]



## 8. PRIMJERI TOPLINSKE OBRADJE ZAVARENIH SPOJEVA IZ INDUSTRIJE

Suvremena oprema za toplinsku obradu omogućuje predgrijavanja, grijanje tijekom zavarivanja te naknadnu obradu u radionici ili na terenu, uz optimalne uvjete korištenja. Ta se oprema lako sastavlja u trajnu ili privremenu peć za toplinsku obradu ili se jednostavno montira oko zavarenih spojeva na montaži i u radionici radi predgrijavanja i odžarivanja.

Primjena toplinske obrade zavarenih spojeva je često neizbježan segment montaže metalnih konstrukcija i proizvoda. U nastavku će biti prikazani neki slučajevi toplinske obrade koji se često susreću u industrijskoj praksi.

### 8.1. Problematika zavarivanja suvremenog čelika ASTM A335 P92 u kotlovskoj industriji

Sve donedavno su se u kotlovskim postrojenjima najčešće primjenjivali niskolegirani ugljični čelici svojstava primjerenih radu na povišenim ili visokim temperaturama. Zaštita od direktnog kontakta s plamenom izvodila se pomoću obloga koje su uglavnom iz materijala na bazi vatrootpornog čelika, vatrootpornog šamota ili keramičkih vatrootpornih materijala.

Danas se sve češće u ta postrojenja ugrađuju moderni austenitni visokotemperaturni čelici, legure s velikim sadržajem nikla ili martenzitni čelici za povišene temperature. Kod takvih materijala, toplinska obrada predstavlja određenu specifičnost s problematikom oko utjecaja pojedinih parametara toplinske obrade na konačna svojstva dobivena u zavarenim spojevima.

Jedan od čelika koji se sve češće koristi u kotlovskim postrojenjima predviđenim za rad s parametrima koji su na gornjoj granici izdržljivosti je čelik ASTM A335 P92 (prema ASTM standardu). Njihova je primjena prije svega u izradi cijevnih sustava postrojenja. Čelik ASTM A335 P92 je čelik sa 9 % Cr, 1,8 % W i 0,5 % Mo, uz dodatak mikrolegirajućeg elementa bora (<0,006 %). Kompletan kemijski sastav naveden je u tablici 3.

Tablica 3. Kemijski sastav čelika ASTM A335 P92 [14]

Legirni element	Cr	Mo	C	Mn	Ni	V	Nb	W
Maseni udio, [%]	8,50-9,50	0,30-0,60	0,07-0,13	0,30-0,60	< 0,40	0,15-0,25	0,04-0,09	1,50

Kod zavarivanja čelika ASTM A335 P92 obavezno se provodi i predgrijavanje i naknadna toplinska obrada zavora. Predgrijavanjem se smanjuje rizik od nastajanja pukotina uslijed djelovanja difundiranog vodika, a temperatura predgrijavanja je najčešće 200 °C. Ta temperatura može biti nešto niža (između 100 °C i 150 °C) ukoliko se zavaruje TIG postupkom. Međuprolazna temperatura pri zavarivanju je ograničena na 300 °C čime se osigurava transformacija svakog prolaza u martenzit. Ta međuprolazna temperatura održava zavar unutar intervala  $M_s$  i  $M_f$ , što iznosi između 105 °C i 390 °C.

Prije primjene naknadne toplinske obrade zavarenog spoja, potrebno je ohladiti radni komad ispod 100 °C. Razlog tome je niska  $M_f$  temperatura (105 °C). Naknadna obrada za čelik ASTM A335 P92 smatra se obaveznom, neovisno o debljini materijala, iz razloga što je tvrdoća metala zavora i ZUT-a oko 400 do 450 HV.

Minimalna temperatura toplinske obrade zavarenog spoja je 730 °C, međutim u praksi su te vrijednosti čak i više, sve do 815 °C. Vrlo je bitno da temperatura toplinske obrade ne prijeđe iznos  $A_{c1}$  jer će to rezultirati formiranjem austenita, te posljedično stvaranjem krhkog martenzita nakon hlađenja. Najčešće korištena temperatura žarenja za čelik ASTM A335 P92 je 760 °C. Vrijeme držanja na toj temperaturi može biti različito, najčešće između dva i četiri sata.

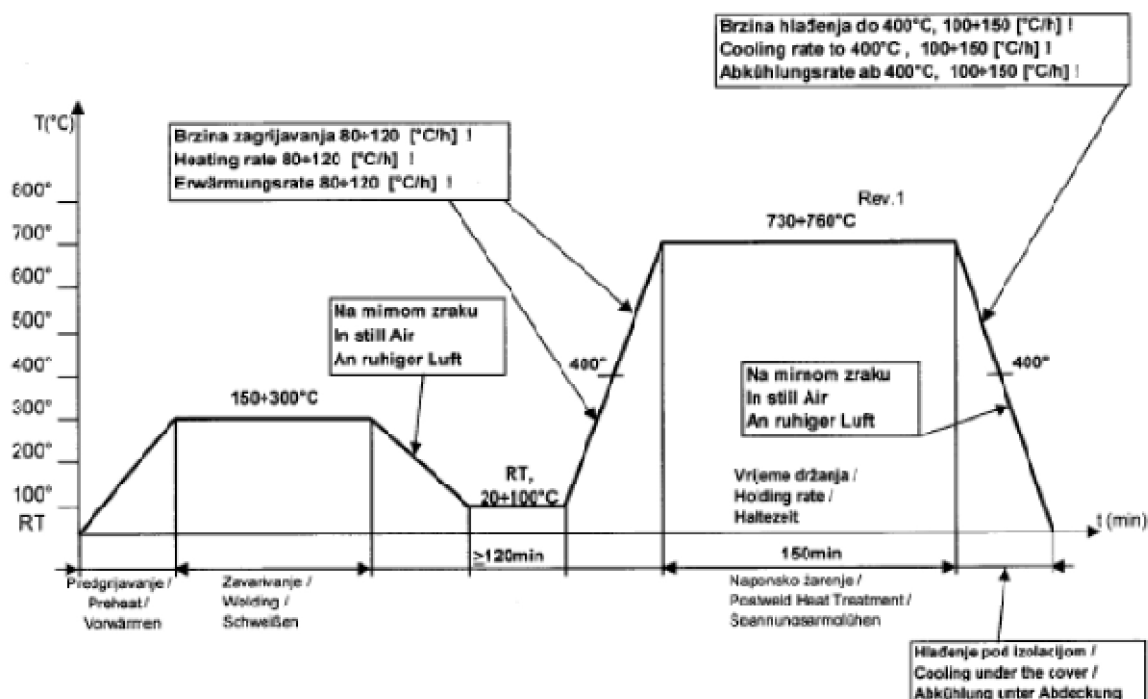
Primjer zavarivanja ove vrste čelika prikazan je u nastavku.

Potrebno je bilo zavariti cijev dimenzija  $\varnothing 323,9 \times 39,3$  mm iz materijala ASTM A335 P92. Za zavarivanje je primjenjena kombinacija postupaka TIG (5 prolaza) + EPP(50 prolaza), a osnovni parametri zavarivanja navedeni su u tablici 4.

Tablica 4. Osnovni parametri zavarivanja TIG + EPP [15]

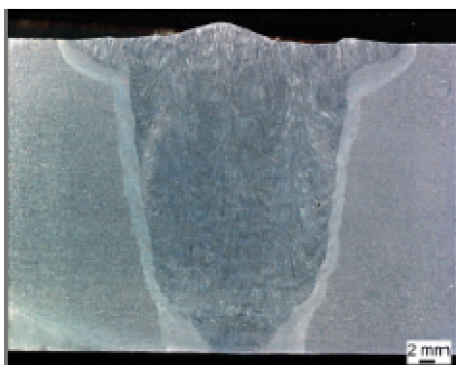
Broj prolaza	Dodatni materijal		$I$ , [A]	$U$ , [V]	Brzina zav. [cm/min]	Zaštitni plin	$T_m$ , °C
	Žica+prašak	$\varnothing$ , mm					
1-5	Thermanit MT5 616	2,4	100-140	-	-	Ar (9 l/min)	232-240
5-55	Thermanit MT5 616 + Marathon 543	2,4	320-333	29-30	40-65	-	200-350

Posebnu važnost potrebno je posvetiti prigrjavanju, međurolaznoj temperaturi, režimima hađenja tijekom zavarivanja te naknadnoj toplinsko obradi. Ukoliko se ne poštuju zadani parametri, zavar neće imati potrebna mehanička svojstva. Slika 19 pokazuje teoretski dijagram toplinske obrade prije, tijekom i nakon obavljenog zavarivanja cijevi.



Slika 19. Teoretski dijagram toplinske obrade za čelik ASTM A355 P92 [15]

Nakon zavarivanja i toplinske obrade, provedena su ispitivanja svojstava zavarenog spoja. Slika 20 prikazuje makro izbrusak izvedenog zavara, a karakteristične vrijednosti svojstava navedeni su u tablici 5.



Slika 20. Makroizbrusak zavara TIG + EPP [15]

Tablica 5. Rezultati ispitivanja [15]

Broj uzorka	$R_e$ , [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ , [N/mm <sup>2</sup> ]	Udarni rad loma, [J]		HV10
			Metal zavara	ZUT	
1	537	698	75, 71, 70	173, 170, 168	OM: 210-230 ZUT: 219-240 MZ: 225-258

Dobiveni rezultati pokazuju da je najvažniji utjecajni faktor na svojstva zavarenog spoja upravo toplinska obrada istih. Provedena ispitivanja u ovom konkretnom slučaju nisu dovoljni za kvalitetnu valorizaciju zavarljivosti i učinka toplinske obrade na zavareni spoj, međutim vrlo su indikativni i, kao takvi, služe kao smjerokaz u praksi zavarivanja ove vrste čelika.

## 8.2. Utjecaj toplinske obrade na svojstva zavora kod zavarivanja cijevi u čvorištu

Spajanje više cijevi u jednom čvorištu je tehnološki zahtjevan postupak. Takvi su spojevi podložni visokim razinama naprezanja i dinamičkim opterećenjima, pa su stoga vrlo osjetljivi na pojavu pukotina. U nastavku će biti prikazani rezultati ispitivanja jednog istraživanja o utjecaju naknadne toplinske obrade na dinamičku izdržljivost zavarenog spoja.

Cijevne konstrukcije se koriste za izgradnju mostova, morskih objekata (platformi i sl.) i dr. Možda i najzahtjevnija konstrukcija, s obzirom na integritet konstrukcije je izrada kрана velikih strojeva za iskop kamena, šljunka i sl.(slika 21.).



Slika 21. Stroj za iskop kamena [16]

Kran, koji je izrađen od cijevnih elemenata, podnosi visoka dinamička opterećenja u velikom broju ciklusa, ponekad i do 500 000 ciklusa godišnje. Takva opterećenja nerijetko izazivaju pukotine u zavarenim spojevima glavnih cijevnih nosača i poprečnih cijevi za ukrutu i učvršćivanje konstrukcije. Troškovi otkrivanja i popravaka tih pukotina su značajna financijska stavka u ovoj grani rudarske industrije.

Uzrok nastanka pukotina je često kompleksan. Uobičajeno je da je koncentracija naprezanja najveća na mjestima nepotpunog provara, uključaka troske ili sličnih grešaka u zavaru. Na dinamičku izdržljivost konstrukcije uvelike utječu i zaostala naprezanja koja su se razvila uslijed solidifikacije materijala pri zavarivanju. Ta se naprezanja mogu smanjiti toplinskom ili mehaničkom obradom zavarenih spojeva. Naknadna toplinska obrada zavarenih spojeva ovakvih konstrukcija nije obavezna i često se uopće ne izvodi na ovim i sličnim konstrukcijama, međutim može imati vrlo povoljne utjecaje na mehanička svojstva u radu.

Na slici 22 prikazano je čvorište na kojem je vršeno ispitivanje utjecaja toplinske obrade. Spoj se sastoji od glavnog cijevnog nosača promjera 406 mm i debljine stijenke 19 mm, te četiri manje cijevi za ukrutu i učvršćivanje cijele konstrukcije kрана, promjera 168 mm i 219 mm i debljine stijenke od 8 mm. Sve su cijevi od običnog ugljičnog čelika, a kemijski sastav prikazan je u tablici 6.



Slika 22. Čvorište cijevi za izradu kрана stroja za iskop kamena [17]

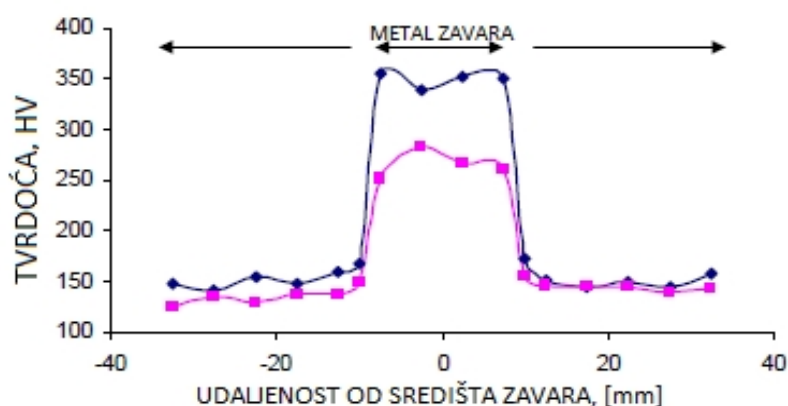
Tablica 6. Kemijski sastav čelika za izradu cijevi [17]

Kem. Element	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	V
Maseni udio, [%]	0,19	0,22	0,96	0,08	0,10	0,03	0,07	0,08

Toplinska obrada ovog čvorišta provedena je u laboratorijskim uvjetima, prema američkoj normi AWS D1.1. Procedura toplinske obrade obuhvaćala je jednoliko progrijavanje po čitavom presjeku radnog komada na temperaturu od 600 °C, držanje na toj temperaturi 60 minuta, te jednoliko hlađenje na sobnu temperaturu. Slika 23 prikazuje ispitni komad spreman za toplinsku obradu, a na slici 24 prikazan je dijagram tvrdoće metala zavora prije i nakon zavarivanja.



Slika 23. Radni komad spreman za proces toplinske obrade [17]



Slika 24. Dijagram tvrdoće prije (plava krivulja) i nakon (roza krivulja) toplinske obrade [17]

Mjerenja tvrdoće provedena su metodom po Vickersu, a prije ispitivanja, površina je očišćena alkoholom i ispolirana. Rezultati ispitivanja jasno pokazuju da se toplinskom obradom značajno snižava tvrdoća u metalu zavora, a samim time se u određenoj mjeri povećava žilavost.

S obzirom da ovako konstruirana i izvedena konstrukcija kрана u sebi sadrži relativno visoka zaostala naprezanja, toplinska obrada trebala bi pomoći u redukciji tih naprezanja. Mjerenja, izvedena u području zavarenih spojeva, pokazala su da smanjenje zaostalih naprezanja u aksijalnom smjeru iznosi približno 40 %. Ispitivanja granice elastičnosti pokazuju određeno smanjenje nakon toplinske obrade (3 % – 11 %), što je nepoželjno, ali i dalje u zahtjevanom području čvrstoće. Uzevši u obzir dobre i loše strane toplinske obrade, vidljivo je da smanjenjem zaostalih naprezanja uvelike utječemo na dinamičku izdržljivost, izbjegavanje nastanka pukotina te posljedično na produženje životnog vijeka konstrukcije i smanjenje troškova u eksploaciji.

## 9. SITNOZRNATI ČELICI

Usitnjenje zrna kod čelika jedan je od osnovnih mehanizama očvršnuća – povećanja vlačne čvrstoće. Usitnjenjem zrna povećava se otpor gibanju dislokacija uslijed većih kutova granica zrna i većeg broja samih zrna. Prije nego što se na granicama zrna pojavi kritična duljina prepreka, koja bi uzrokovala nastanak pukotine, dolazi do procesa klizanja preko granice klizanja u susjedno zrno. To se događa ukoliko su zrna povoljno orijentirana, za što je veća vjerojatnost ukoliko su zrna sitnija. Ovaj mehanizam očvršnuća je važan jer jedini povisuje granicu razvlačenja, a da istobno snižava i prijelaznu temperaturu.

Sitnozrnati čelici su u industrijskoj upotrebi već dugi niz godina, ali se i danas usavršavaju njihova svojstva i načini proizvodnje. Karakterizira ih relativno visoka vrijednost čvrstoće i granice razvlačenja uz vrlo dobru žilavost i istežljivost. Sitnozrnati čelici, uz sve to, posjeduju još jedno povoljno svojstvo, a to je niska temperatura prijelaza u krhko stanje, što ih čini pogodnim za primjenu u područjima sa hladnijim klimatskim uvjetima. [18]

Sitnozrnatim se čelicima dodaju male količine disperziranih legirajućih elemenata ( $<0,1\%$ ) pa se još nazivaju i mikrolegirani sitnozrnati čelici. Ako posjeduju vrlo visoku vrijednost granice razvlačenja ( $R_e > 550 \text{ N/mm}^2$ ) onda spadaju u grupu mikrolegiranih sitnozrnatih čelika povišene čvrstoće ili HSLA( eng. High strength low alloyed steel). [18]

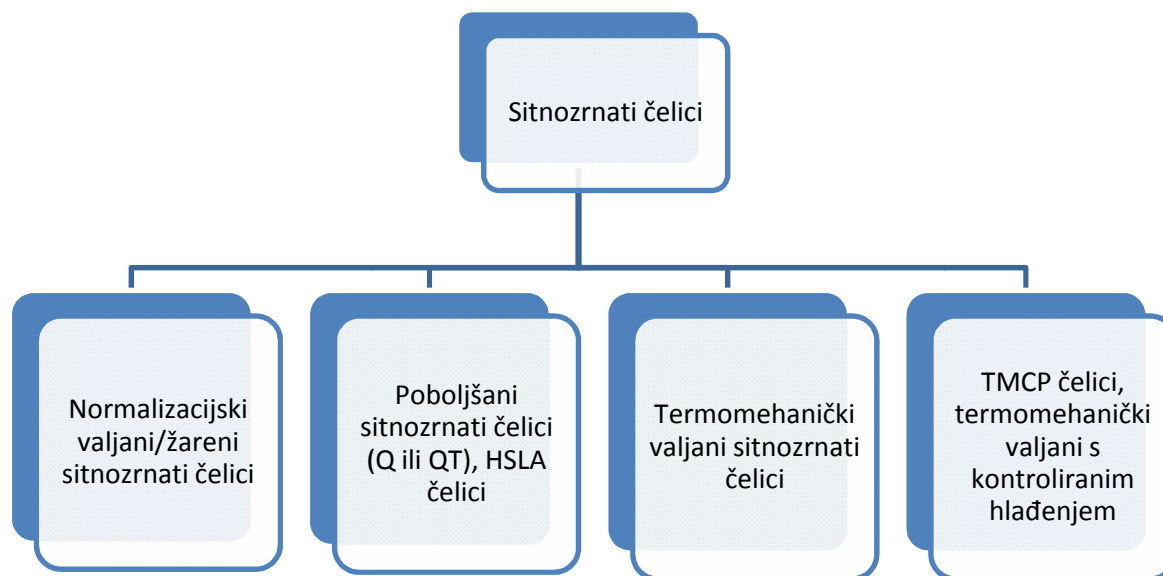
Zavarljivost sitnozrnatih čelika je teoretski vrlo dobra. Imaju nizak sadržaj ugljika i ostalih legiranih elemenata što je nužan uvjet dobre zavarljivosti. Norma koja propisuje preporuke za zavarivanje sitnozrnatih čelika je HRN EN 1011-2:2002/A1. Mogući problemi koji se mogu javiti kod zavarivanja su: [19]

1. Nastanak hladnih pukotina izazvanih vodikom u metalu zavara i u ZUT-u,
2. Sniženje žilavosti i povećanje prijelazne temperature krhkosti uslijed pogrubljenja zrna ili zakaljivanja,
3. Sniženje čvrstoće u ZUT-u



### 9.1. Osnovne grupe sitnozrnatih čelika

Sitnozrnati se čelici najčešće dijele u četiri osnovne podskupine, a shematski je ta podjela prikazana na slici 25.



Slika 25. Podjela sitnozrnatih čelika

#### 9.1.1. Normalizacijski valjani sitnozrnati čelici

Normalizacijsko valjanje je postupak konvencionalnog valjanja koji se odvija nakon toplinske obrade normalizacijskog žarenja, kojem je svrha usitnjenje zrna. Kod podeutektoidnih čelika, temperatura normalizacije je (30-50) °C iznad linije  $A_3$ , a hlađenje se izvodi na zraku. Za dodatno osiguranje usitnjenja zrna, ovom se čeliku dodaju mikrolegirni elementi Nb, Ti, V. Oni se spajaju s ugljikom i dušikom tvoreći karbide, nitride i/ili karbonitride i tako pojačavaju utjecaj AlN čime se osigurava dodatno usitnjenje zrna. Snižavanjem završne temperature valjanja sprječava se rekristalizacija austenita, te je austenitno zrno sitnije, što osigurava nastanak sitnijeg feritnog ili perlitnog zrna. Postoji pravilo da je broj feritnih klica po jedinici duljine austenitnih zrna konstantan.[20]

#### 9.1.2. Poboljšani sitnozrnati čelici

Ova vrsta čelika se od uobičajenih čelika za poboljšavanje razlikuje i po nižem sadržaju ugljika do 0,22%. Problem kod njih se prvenstveno pojavio jer se snižavanjem udjela ugljika počela smanjivati i granica razvlačenja. To se moralo nadoknaditi legiranjem uslijed kojeg se neminovno snižava temperatura  $M_s$ . Zbog toga je postojala opasnost od gubitka povećane

granice razvlačenja već pri malom povišenju temperature, posebno u ZUT-u pri zavarivanju. Povoljno djelovanje na otpornost popuštanju i skraćivanje bainitne pretvorbe ima molibden, čiji se utjecaj povećava uz prisustvo kroma.

Moderni poboljšani čelici dobiveni su kombinacijom spoznaja o utjecaju mikrolegirajućih elemenata te o potrebi prokaljivanja radi postizanja visoki žilavosti popuštanjem. Koncept sastava poboljšanih sitnozrnatih čelika baziran je na: [18]

- Što niži postotak ugljika radi zavarljivosti;
- Mikrolegiranje elementima koji omogućuju prokaljivost barem 90% martenzita i bainita u jezgri;
- Postizanje niskougljičnog martenzita ili bainita hlađenjem na zraku, da bi se nakon zavarivanja dobila ista svojstva u ZUT-u i osnovnom materijalu;
- Legiranje disperzivnim elementima koji osiguravaju sitnije zrno.

Postupak dobivanja ovih čelika sastoji se od toplog valjanja, u kojem se predvaljanje i završno valjanje odvija u austenitnoj fazi u kojoj je rekristalizacija potpuna. Hlađenje do sobne temperature se odvija na zraku ili u vodi, a konačna struktura postiže se popuštanjem.[19] Takvi se čelici nazivaju još i HSLA čelici, a u odnosu na normalizacijski valjane sitnozrnate čelike, svojstva su im višestruko bolja. Posjeduju vrlo dobru zavarljivost uz vrlo visoku granicu razvlačenja – sve do 1000 N/mm<sup>2</sup>.

### ***9.1.3. Termomehanički valjani sitnozrnati čelici***

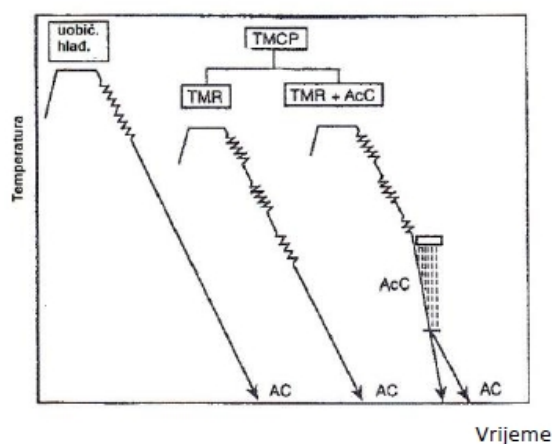
Termomehaničko valjanje je postupak valjanja sitnozrnatih u kojoj se predvaljanje izvodi u austenitnoj fazi u kojoj je rekristalizacija potpuna, a završno valjanje se izvodi u fazi u kojoj je rekristalizacija spriječena. Nakon završetka valjanja toplovaljani poluproizvod se hladi vodom do temperatura na kojima je završena transformacija iz austenita u ferit. [19] Termomehaničkim valjanjem se dobiva još sitnije zrno čime se dodatno poboljšavaju mehanička svojstva. Ova vrsta čelika se lako hladno oblikuje. Primjenu pronalaze u mostogradnji, autoindustriji, u izradi dijelova dizalica i za ostale visokooterećene konstrukcije. Proizvodnja termomehanički valjanih sitnozrnatih čelika je ekonomski vrlo isplativa i tehnički učinkovita, sa brzinama valjanja do 20 m/s.[18]

#### 9.1.4. TMCP čelici

TMCP (Thermo-Mechanical Controlled Process) su čelici čiji se postupak dobivanja sastoji od termomehaničkog valjanja i kontroliranog hlađenja. U odnosu na prethodno navedene grupe sitnozrnatih čelika, ova vrsta ima još povoljnija mehanička i tehnološka svojstva. Razvijeni su u Japanu osamdesetih godina prošlog stoljeća, a do danas su doživjeli mnoga poboljšanja. Prilikom dobivanja ove vrste čelika, kontroliranim valjanjem u nerekristalizacijskom području, stvara se sitnozrnati austenit. Nakon toga slijedi kontrolirano hlađenje čime se dobiva struktura igličastog ferita ili gornjeg bainita, koji su vrlo sitnog zrna i posebnih svojstava. Takva mikrostruktura omogućuje relativno visok unos topline pri zavarivanju, bez značanih pogoršanja svojstava čelika. Tvrdća ovih čelika niža je od konvencionalnih čelika. [18]

Zavarivanje TMCP čelika je zbog vrlo niskog sadržaja ugljika olakšano, te najčešće nije potrebno predgrijavanje radnih komada. Međutim, TMCP čelici osjetljivi su na vodik i pojavu hladnih pukotina uzrokovanih vodikom, posebice u metalu zavora. Atomarni vodik  $H^+$  lako putuje kroz kristalnu rešetku čelika, te sa ostalim atomima vodika u mikrošupljinama može stvoriti molekulu vodika  $H_2$ . Kao posljedica toga stvara se visoki lokalni tlak koji može u materijalu izazvati naprezanja, koja će izazvati pukotine u metalu zavora.

Postupak dobivanja TMCP čelika je složen i potreban je suvremen pogon s visokim osiguranjem kvalitete u svakom stupnju proizvodnje. Na slici 26 shematski je prikazan postupak proizvodnje TMCP čelika (prema IACS – International Association of Classification Societies), pri čemu AC označava hlađenje na zraku, a AcC ubrzano hlađenje.



Slika 26. Shematski prikaz TMCP postupka [21]

## 9.2. Toplinska obrada sitnozrnatih čelika nakon zavarivanja

Toplinska obrada nakon zavarivanja ne preporuča se za čelike koji otvrdnjavaju ubrzanim hlađenjem. To vrijedi i za normalizaciju i za poboljšavanje. Dopušteno je žarenje za redukciju zaostalih naprezanja, ukoliko je neophodno. Temperatura i vrijeme žarenja u tom su slučaju ograničeni na donje vrijednosti snižavanja naprezanja. Parametri su dani u standardima za čelične proizvode. Posebna opasnost od nastanka pukotina uslijed ponovnog zagrijavanja primjećena je kod čelika sa povišenim sadržajem niobija. Kod njih, uslijed interkristalne korozije, dolazi do snižavanja plastičnosti na granicama zrna zbog izlučivanja i otvrdnjavanja taloženjem. Taj efekt je posebno opasan kod termomehanički obrađenih sitnozrnatih čelika, jer oni sadrže elemente koji otvrdnjavaju taloženjem.

Utjecajni faktori koji su ključni za sklonost nastanku pukotina uslijed ponovnog zagrijavanja su: [18]

- Kemijski sastav čelika,
- Toplinski ciklus zavarivanja,
- Vlastita naprezanja u zoni zavarenog spoja,
- Parametri toplinske obrade nakon zavarivanja;

## 9.3. Nastanak hladnih pukotina

Hladne pukotine nastaju u ZUT-u i metalu zavara ispod 300 °C, a mogu se pojaviti i nekoliko dana nakon zavarivanja.. Na njihov nastanak utječu mikrostruktura, zaostala naprezanja i količina vodika u zavaru. Vodik je jedan od glavnih uzročnika nastanka hladnih pukotina. U zavareni spoj ulazi iz kontaminiranog zraka, vlažnih elektroda, nečistoća na površini materijala ili iz zaštitnog plina. Difundiranjem vodika u zavareni spoj smanjuje se deformabilnost martenzita koji nastaje zakaljivanjem te tako uzrokuje nastanak hladnih pukotina. Ta pojava je posebno primjetna kod normaliziranih sitnozrnatih čelika s granicom razvlačenja od 460 N/mm<sup>2</sup> i vodom hlađenih poboljšanih čelika.

U metalu zavara pukotine mogu nastati iz nekoliko razloga:

- Prevelika količina legirnih elemenata
- Prevelika debljina spoja
- Neprikladno oblikovanje spoja (višeosno naprezanje, uklještenje i dr.)

Za materijale debljine iznad 30 mm preporuča se zagrijavanje za otpuštanje vodika, što se odvija na 200°C u trajanju od barem dva sata.

Termomehanički valjani sitnozrnati čelici nisu skloni nastanku hladnih pukotina u ZUT-u. Sadržaj ugljika kod njih je dodatno snižen, mikrostruktura je niskougljična martenzitna pa je i sklonost zakaljivanju niska. Budući da je fazna transformacija iz ferita u austenit na višim temperaturama kod termomehanički obrađenih sitnozrnatih čelika sklonost nastanku pukotina veća je u metalu zavora nego u ZUT-u.

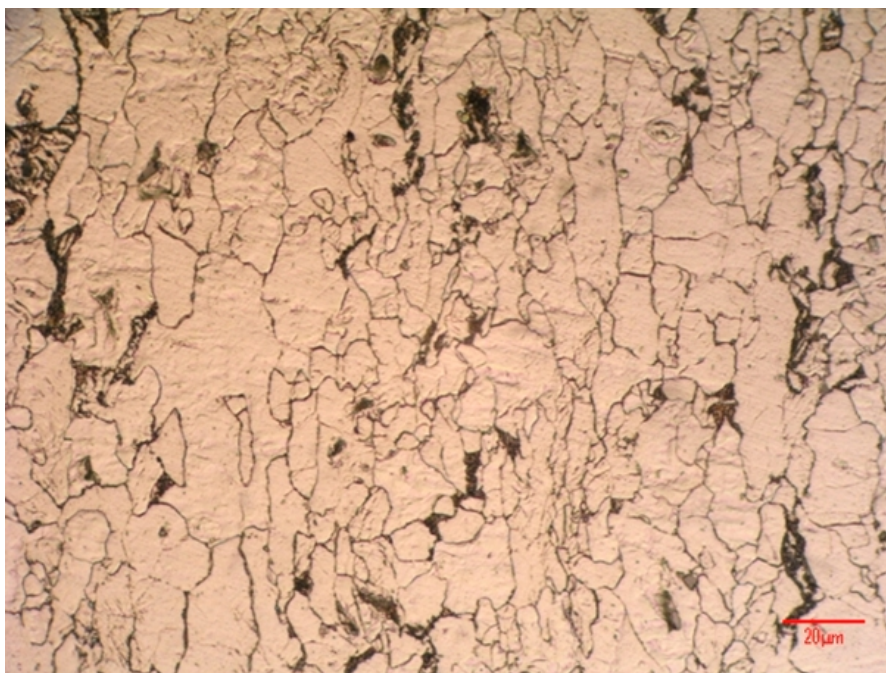
#### 9.4. Čelik SA516 Gr 70 Mod LTV

Čelik SA516 Gr 70 Mod LTV (prema ASME standardu) pripada u grupu sitnozrnatih TMCP čelika, a karakterizira ga vrlo nizak sadržaj ugljika u kemijskom sastavu. Kemijski sastav čelika SA516 Mod LTV, koji je korišten u izradi eksperimenta prikazan je u tablici 7. Za utvrđivanje kemijskog sastava korištena je kvantitativna kemijska analiza materijala. Analiza je obavljena spektrometrijskom metodom na uređaju SPECTRUMAT-750 GDS Leco i dobiveni su sljedeći rezultati:

Tablica 7. Kemijski sastav čelika SA516 Gr 70 Mod LTV

	Element, %								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
Uzorak 1	0,03	0,35	1,03	0,010	0,001	0,06	0,28	0,23	0,01

Mikrostruktura ovog čelika je feritno perlitna, s vrlo malim udjelom perlitne faze, a prikazana je na slici 27.



Slika 27. Mikrostruktura čelika SA 516 Gr 70 Mod LTV

Ova vrsta čelika ima čestu primjenu u izgradnji tlačnih posuda i spremnika. Zbog svojih svojstava, mogu se primjenjivati i pri nižim eksploatacijskim temperaturama.

Toplinska obrada zavarenih spojeva od čelika SA 516 Gr 70 Mod LTV smatra se problematičnom i najčešće se u praksi ne propisuje, jer zavareni spoj i bez toplinske obrade zadržava dobra mehanička svojstva nakon zavarivanja. Ukoliko je toplinska obrada propisana, to je najčešće s ciljem povećanja istezljivosti i žilavosti, međutim, neminovna posljedica je sniženje tvrdoće. U provedenom eksperimentu ispitan je utjecaj toplinske obrade na zavareni spoj od ovog čelika i dana je analiza dobivenih rezultata.

## 10. EKSPERIMENTALNI DIO

### 10.1. Uvod u eksperiment

Na temelju proučene literature i poznate problematike zavarivanja sitnozrnatih čelika proveden je eksperimentalni rad s ciljem utvrđivanja utjecaja toplinske obrade na svojstva zavarenog spoja čelika SA 516 Gr.70 Mod LTV. Prema planu pokusa, zavarene su dvije ploče, debljine 38 mm, uz predgrijavanje na zahtjevanoj temperaturi. Nakon zavarivanja, jedan dio zavarenog komada podvrgnut je toplinskoj obradi, dok je za drugi dio postavljen zahtjev zagrijavanja u svrhu odstranjivanja vodika.

Nakon zavarivanja i toplinske obrade, iz zavarenih ploča izrezani su uzorci za provođenje ispitivanja mehaničkih svojstava. Provedenim ispitivanjima utvrđen je utjecaj toplinske obrade na svojstva zavares, analizirani su i interpretirani dobivni rezultati, te je iz svega toga donesen zaključak o potrebi toplinske obrade kod zavarivanja ploča debljina 38 mm od čelika SA516gr70.

Za spajanje ploča odabran je postupak zavarivanja praškom punjenom žicom (FCAW) u zaštitnoj atmosferi zaštitnog plina, a cijeli proces izveden je automatizirano pomoću BUGO automata. Zavarivanje je izvedeno u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a toplinska i strojna obrada, te mehanička ispitivanja također u pripadajućim laboratorijima na istom fakultetu.

U nastavku je detaljno opisano provođenje svakog koraka eksperimenta, od zavarivanja pa sve do ispitivanja, uz detaljnu analizu i zaključak eksperimenta.

Ciljevi eksperimentalnog rada:

1. Određivanje utjecaja toplinske obrade na svojstva zavarenog spoja od čelika SA 516 MOD LTV
2. Donošenje zaključka o optimalnoj tehnologiji zavarivanja i toplinske obrade



## 11. ZAVARIVANJE

### 11.1. Priprema za zavarivanje

Prije izvođenja zavarivanja potrebno je bilo pripremiti ploče za zavarivanje, te pripremiti aparaturu i uređaje za zavarivanje. Za pripremu radnih komada plinskim su postupkom izrezane dvije ploče dimenzija 500 x 150 x 38 mm. Plinski plamen je bio mješavina acetilena i kisika, a ploče su rezane na automatskoj plinskoj stanici u Laboratoriju za zavarivanje. Na slici 28 prikazano je izvođenje plinskog rezanja ploča.



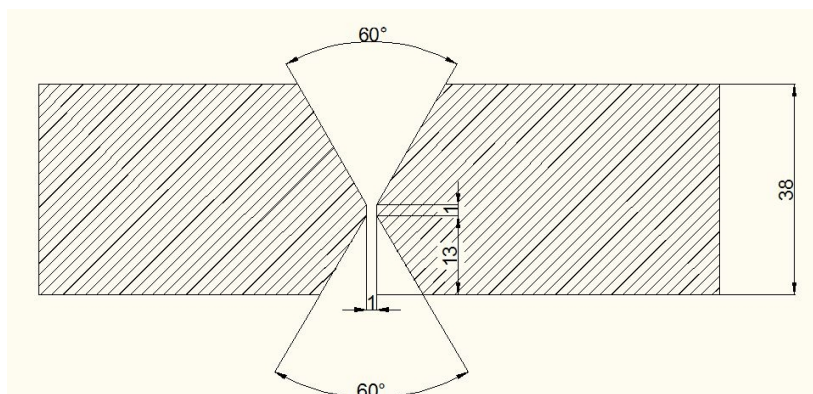
Slika 28. Plinsko rezanje ploča

Nakon izrezivanja ploča navedenih dimenzija uslijedila je priprema nesimetričnog X-spoja, te je napravljena predeformacija radnog komada od  $5^\circ$ . Predeformacija je potrebna iz razloga što se radi o radnom komadu velike debljine. Zavarivanje takvog komada provodi se u više prolaza pri čemu se u materijal unosi mnogo toplinske energije. Kao posljedica javlja se



određena deformacija uslijed skupljanja metala zavora prilikom ohlađivanja. Postavljanjem predeformacije se osigurava da će nakon zavarivanja ploča biti relativno ravna.

Na slici 29 prikazana je priprema spoja, izvedena prema EN-ISO 9692-1. [22]



Slika 29. Priprema spoja

Nakon izvršene pripreme i predeformacije, radni komad se postavio na automat, te su utvrđeni parametri zavarivanja i temperatura predgrijavanja.

### 11.2. Predgrijavanje

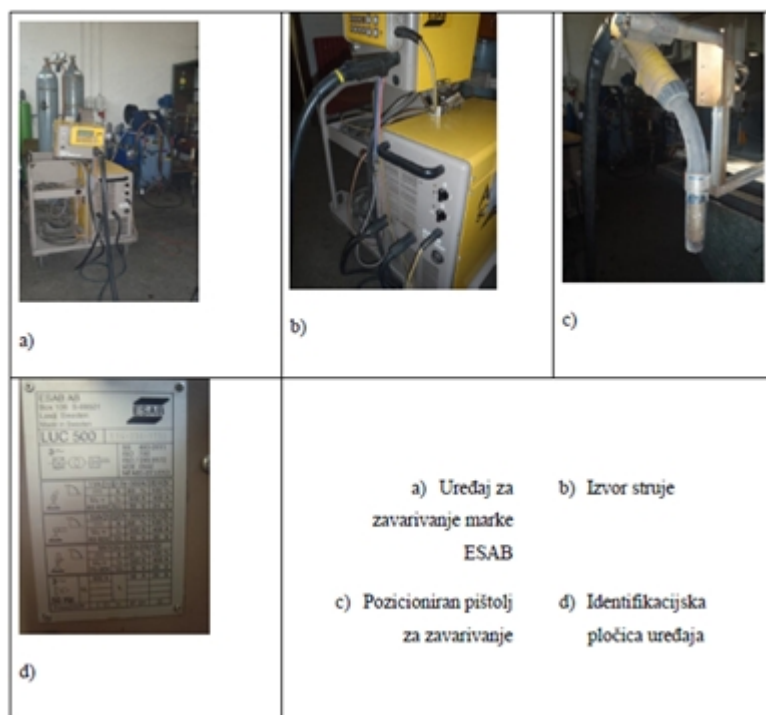
Predgrijavanje radnog komada izvodilo se plinskim postupkom uz mješavinu propan-butana i kisika, a temperatura predgrijavanja iznosila je 100 °C, provjerena laserskim termometrom. Predgrijavanje je izvedeno kao mjera predostrožnosti da ne dođe do naljepljivanja zavora na stijenke radnog komada, budući da je kod radnih komada ovakvih debljina (38 mm) odvođenje topline vrlo veliko. Na slici 30 prikazan je postupak izvođenja predgrijavanja u laboratoriju.



Slika 30. Predgrijavanje plinskim plamenom

### 11.3. Zavarivanje

Nakon postizanja zadane temperature predgrijavanja pristupilo uslijedilo je zavarivanje radnog komada. Zavarivanje je u potpunosti izvedeno korištenjem postupka FCAW (praškom punjena žica, 136) u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina, uz pomoć automata američke proizvodnje, imena BUGO. Uređaj za zavarivanje (slika 31) je od proizvođača ESAB, model Aristo 500 i dodavačem žice ESAB A10-MED44. Zaštitni plin korišten prilikom zavarivanja bio je mješavina argona i ugljikovog dioksida, pri čemu je udio Ar iznosio 82 %, a CO<sub>2</sub> 18 %.



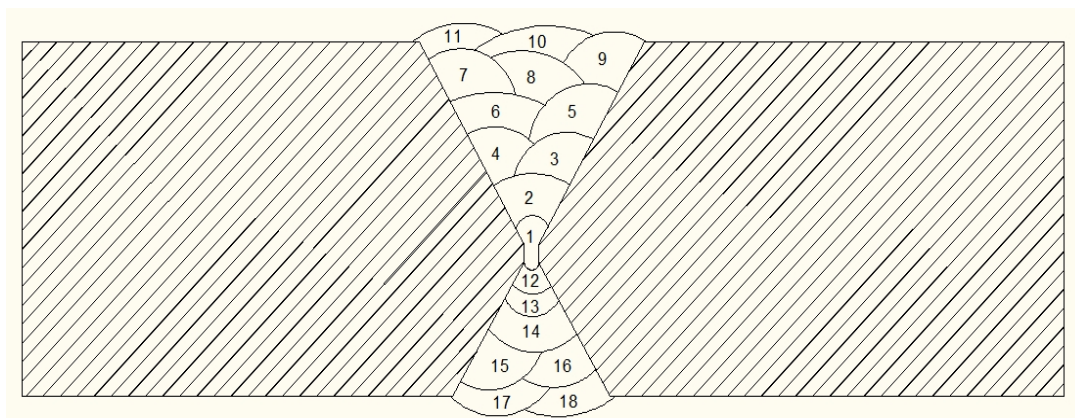
Slika 31. Oprema za zavarivanje [21]

Proces zavarivanja izveden je kroz ukupno 18 prolaza, s ograničenom temperaturom međuprolaza na maksimalno 250 °C. Ta je temperatura kontrolirana nakon svakog prolaza pomoću laserskog termometra, te je uvjet o maksimalnoj međuprolaznoj temperaturi u potpunosti zadovoljen prilikom izvođenja zavarivanja.

Zavarivano je u položenom položaju oznake PA prema normi EN ISO 6947. Zavarivanje se provelo s jedne strane radnog komada. Po završetku, radni komad je okrenut te je i s druge strane zavaren u položenom položaju (PA). Prilikom zavarivanja nije se koristila tehnika njihanja, nego su prolazi izvedeni jednostavnim povlačenjem. Razlog tome je što se povlačenjem ostvaruje niži unos topline nego što je to slučaj kod tehnike njihanja.

Nagib elektrode iznosio je 90° u odnosu na radni komad.

Slika 32 shematski prikazuje slaganje prolaza prilikom zavarivanja, a u tablici 8 prikazani su parametri izmjereni za svaki pojedinačni prolaz.



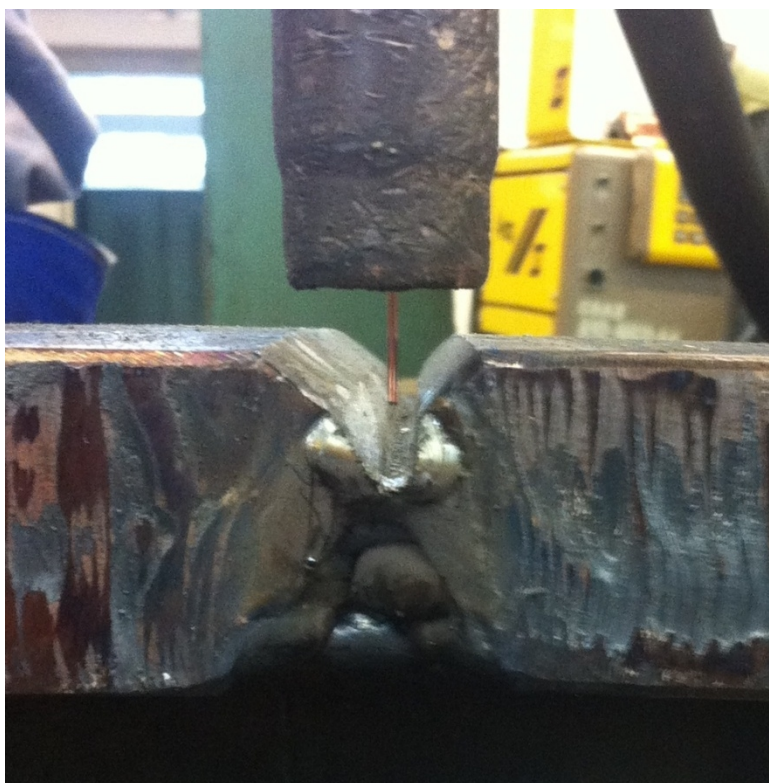
Slika 32. Prikaz slaganja prolaza prilikom zavarivanja

Tablica 8. Parametri zavarivanja

Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [mm/min]	Unos toplote [kJ/mm]
1	FCAW	1,2	245	24,5	DC (+)	11,3	190	1,516
2	FCAW	1,2	245	24,5	DC (+)	11,3	190	1,516
3	FCAW	1,2	240	24,5	DC (+)	11,3	190	1,485
4	FCAW	1,2	240	24,5	DC (+)	11,3	190	1,485
5	FCAW	1,2	236	24,5	DC (+)	11,3	190	1,460
6	FCAW	1,2	236	24,5	DC (+)	11,3	190	1,460
7	FCAW	1,2	240	24	DC (+)	11,3	190	1,455
8	FCAW	1,2	240	24	DC (+)	11,3	190	1,455
9	FCAW	1,2	240	24	DC (+)	11,3	190	1,455
10	FCAW	1,2	240	23,5	DC (+)	11,3	220,8	1,226
11	FCAW	1,2	240	23,5	DC (+)	11,3	190	1,424
12	FCAW	1,2	236	23,8	DC (+)	11,3	400	0,674
13	FCAW	1,2	236	23,8	DC (+)	11,3	350	0,770
14	FCAW	1,2	250	23	DC (+)	11,3	190	1,450
15	FCAW	1,2	240	23,3	DC (+)	11,3	190	1,412
16	FCAW	1,2	236	23,3	DC (+)	11,3	190	1,389
17	FCAW	1,2	236	23,3	DC (+)	11,3	190	1,389
18	FCAW	1,2	236	23,3	DC (+)	11,3	190	1,389

U tablici se vidi da je većina prolaza izvedena sa približno istim parametrima, uz iznimku prolaza broj 12 i 13 kod kojih je brzina zavarivanja i dvostruko veća. Razlog povećane brzine zavarivanja u ta dva prolaza je problematični žlijeb korijenskog prolaza (slika 33). Naime, prilikom zavarivanja prvog prolaza, talina nije imala dovoljnu penetraciju, te je izvođenje dvanaestog prolaza bilo otežano uslijed male širine žlijeba nakon brušenja. Povećanjem brzine zavarivanja spriječeno je podlijevanje taline i osigurano je zadovoljavajuće protaljivanje u korijenu. Ovaj problem mogao se izbjeći ostavljanjem većeg razmaka između ploča prije zavarivanja, primjerice 3 mm umjesto 1 mm.

Nakon završenog procesa zavarivanja, radni komad je prepolovljen plinskim rezanjem, te je jedna polovica stavljena u električnu peć na 200 °C u trajanju od 2 sata, s ciljem odstranjivanja vodika, uz konstantne provjere temperature u peći. Druga je polovica ostavljena da se ohladi na zraku i ona će biti toplinski obrađena u laboratoriju za toplinsku obradu.



Slika 33. Problematični uski žlijeb (12-ti prolaz)

### 11.3.1. Dodatni materijal i zaštitni plin za zavarivanje

Kao dodatni materijal za zavarivanje korištena je rutilna, bešavna žica s vrlo niskim sadržajem vodika. Ovaj dodatni materijal koristi se za zavarivanje visokočvrstih ili niskolegiranih čelika. Primarna namjena ove žice je za zavarivanje posuda pod tlakom, cjevovoda i nosivih konstrukcijskih dijelova, a koristi se i za zavarivanje u off-shore industriji. Proizvođač garantira za ovu žicu izvrsnu žilavost i otpornost na nastanak pukotina u metalu zavara unatoč visokoj čvrstoći osnovnog materijala, visoki udarni rad loma i na -40 °C te nizak sadržaj vodika (manje od 5 ml H<sub>2</sub>/100g metala zavara). Prema preporuci proizvođača, predgrijavanje i međuprolazna temperatura su ovisne o osnovnom materijalu. U tablicama 9 i 10 prikazani su osnovni podaci o dodatnom materijalu.

Tablica 9. Kemijski sastav dodatnog materijala

Kemijski sastav, %	C	Mn	Si	Mo	P	S	Ni
	0,08	1,5	0,5	-	<0,015	<0,015	1,0

Tablica 10. Mehanička svojstva dodatnog materijala

Mehanička svojstva	R <sub>p0,2</sub> , N/mm <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup>	A, %
	550	640 – 760	>18

U okviru ovog eksperimenta, za postizanje zaštitne atmosfere prilikom zavarivanja, koristio se aktivni plin u obliku mješavine argona i ugljikovog dioksida, pri čemu je omjer bio 82 % Ar i 18 % CO<sub>2</sub>. Oznaka plina je M21 prema normi HRN EN 439.

## 12. TOPLINSKA OBRADA ZAVARENIH RADNIH KOMADA

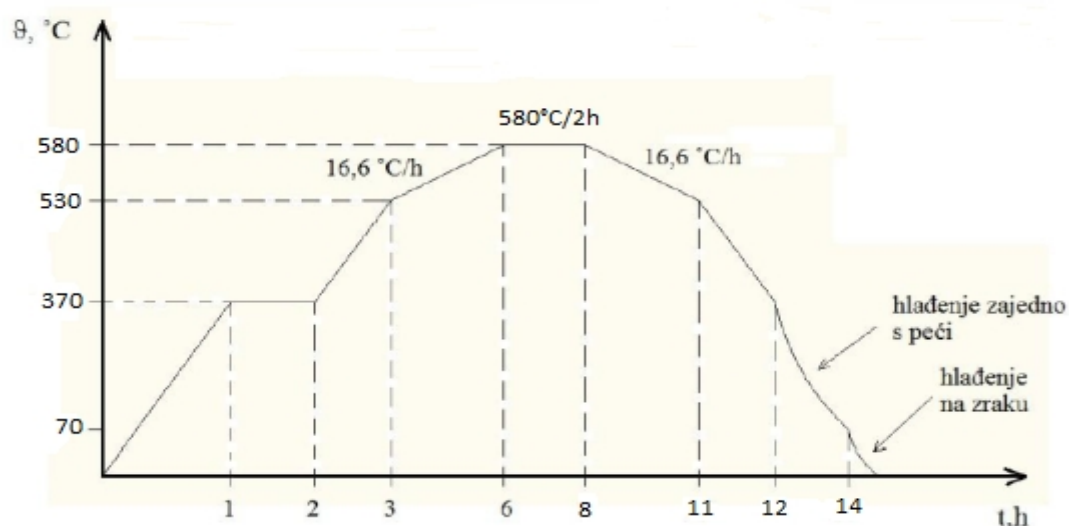
Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, provedena su dva različita postupka toplinske obrade nakon zavarivanja, s ciljem utvrđivanja utjecaja toplinske obrade na svojstva zavarenog spoja.

### 12.1. Dio 1 – Zagrijavanje za odstranjivanje vodika

Jedna polovica radnog komada (dio 1) je odmah nakon zavarivanja i rezanja ostavljena u električnoj peći na 200 °C u trajanju od 2 sata. To zagrijavanje je provedeno s ciljem odstranjivanja vodika, budući da je vodik mobilan u čeliku na temperaturama iznad 150 °C. Na ovaj način vodik se osiguralo dovoljno vremena za izlazak iz materijala, čime se smanjio rizik od pojave hladnih pukotina u metalu zavora na koje je ovaj čelik osjetljiv. Do pukotina dolazi uslijed spajanja atomarnog vodika i formiranja molekula  $H_2$  u mikrošuplinama, te nastanka visokog lokalnog tlaka. Pukotine inducirane vodikom izazivaju, u inače duktilnom materijalu, pojavu krhkog loma pri kontinuiranom opterećenju i pri naprezanju nižem od granice razvlačenja. Ovo zagrijavanje obavljeno je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, uz konstantno provjeravanje temperature zagrijavanja laserskim termometrom.

### 12.2. Dio 2 – Toplinska obrada u vakumskoj peći

Na drugoj polovici (dio 2) provedena je opsežnija toplinska obrada. Na slici 34 prikazan je dijagram toplinske obrade kojoj je podvrgnut ovaj dio radnog komada.



Slika 34. Dijagram toplinske obrade dijela 2

Radni komad postavljen je u vakuumsku peć, te su na računalu uneseni podaci o režimu toplinske obrade. Prilikom zagrijavanja na propisanu temperaturu od 580 °C provedeno je progrijavanje radnog komada na temperaturi od 370 °C, u trajanju od 1 sata, s ciljem postizanja jednolike temperature po cijelom presjeku. Time se osiguralo da ne dođe do toplinskih deformacija uzrokovanih prevelikom razlikom temperature jezge i površine. Nakon toga uslijedilo je daljnje zagrijavanje do konačne temperature, uz posebni režim grijanja u temperaturnom intervalu od 530 °C do 580 °C (16,6 °C/h). Na temperaturi od 580 °C radni komad je zadržan dva sata, nakon čega je uslijedilo hlađenje. Hlađenje do 530 °C odvijalo se po posebnom režimu od 16,6 °C/h, a dalje je radni komad ostavljen da se hladi u peći (od 530 °C do 70 °C) i na zraku (sa 70 °C na sobnu temperaturu).

Cilj ove toplinske obrade je redukcija zostalih naprezanja unesenih zavarivanjem. Budući da je ova vrsta čelika problematična u smislu toplinske obrade zavarenog spoja, propisana temperatura (580 °C) mora biti na donjoj granici temperaturnog intervala za zadanu toplinsku obradu (žarenje za redukciju zaostalih naprezanja).

Za izvođenje toplinske obrade koristila se vakumska peć. Pod vakuumom se podrazumijeva tlak plina ispod atmosferskog, čime se postiže jako razrijeđena zračna atmosfera. U takvoj atmosferi s vrlo malo kisika i vodene pare ne dolazi do oksidacije i razugljičenja. Vakumske peći vrlo su pogodne za automatiziranje toplinske obrade pomoću računala na kojem je instaliran program za vođenje i regulaciju procesa.

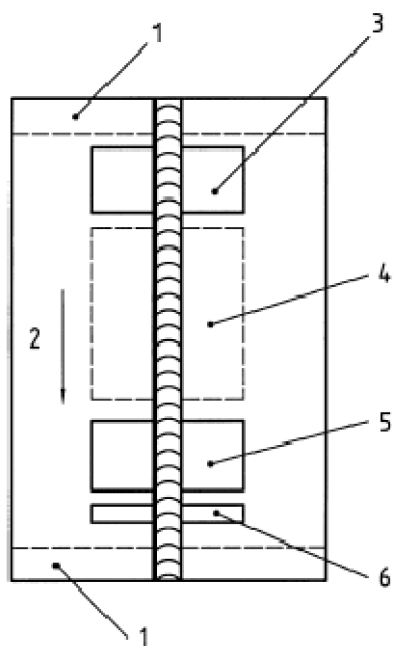
Cijeli postupak obavljen je u Laboratoriju za toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



### 13. IZRADA UZORAKA ZA ISPITIVANJE

Za potrebe ispitivanja mehaničkih svojstava zavarenog spoja, izrađeni su ispitni uzorci za ispitivanje žilavosti i epruvete za statički vlačni pokus. Iz svakog radnog komada pripremljen je po jedan makroizbrusak na kojima je naknadno izmjerena tvrdoća.

Uzorci su izrezani iz ploča prema HRN EN ISO 15614-1 [23] (slika 35), te su strojno obrađeni prema zadanim dimenzijama. Za izradu ispitnih uzoraka korištene su norme EN 895:1995 [24] (statički vlačni pokus) i EN 875:1995 [25] (ispitivanje žilavosti).



Slika 35. Pozicije izrezivanja uzoraka ( 1 - odbacivanje 25 mm, 2 - smjer zavarivanja, 3,5 - epruvete za statičko vlačno ispitivanje, 4 - epruvete za žilavost, 6 - makroizbrusak) [23]

Za provođenje ispitivanja izrađeno je ukupno dvanaest epruveta za ispitivanje žilavosti (po 6 iz svake ploče – 3 za ispitivanje u metalu zavara i 3 za ispitivanje u zoni utjecaja topline). Za ispitivanje vlačne čvrstoće izrađeno je dva para ispitnih epruveta, dok su izrađena i dva makroizbruska na kojima će biti ispitana tvrdoća. Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Rezultati ispitivanja i analiza rezultata prikazani su u nastavku rada.



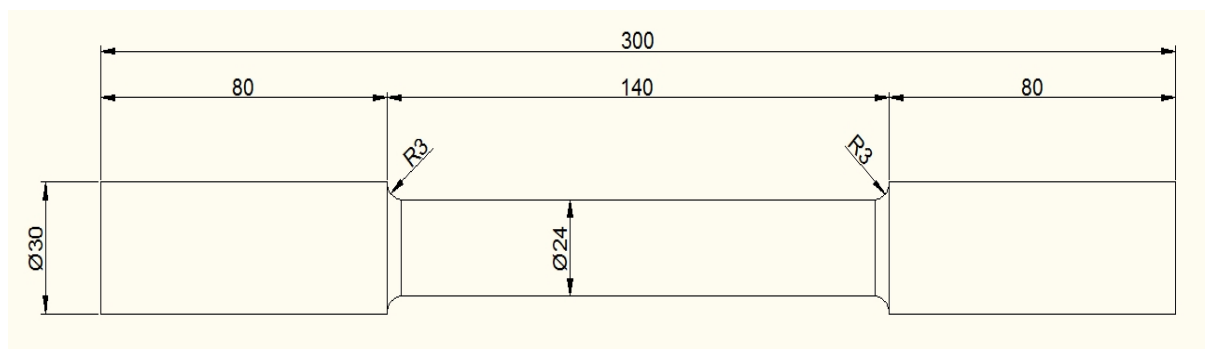
## 14. ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA

### 14.1. Statičko vlačno ispitivanje

Statičkim vlačnim pokusom ispituje se elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprežanja. Ovim se ispitivanjem ujedno određuju i osnovna mehanička svojstva materijala kao što su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća i dr.

Ispitivanje se provodi na uređajima koji se nazivaju kidalice, na kojima se epruvete kontinuirano opterećuju sve do loma. Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i produljenje epruvete, te se grafički određuje dijagram „sila-produljenje“. Na slici 37 prikazano je radno mjesto na kojem su ispitane epruvete izrađene u sklopu ovog eksperimentalnog rada. Kidalice je model EU 40 mod, a prilikom pokusa na epruvetu je postavljen ekstenzimetar MFA2.

Slika 36 prikazuje dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje.



Slika 36. Dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje



Slika 37. Radno mjesto izvođenja statičkog vlačnog pokusa

Statičkim vlačnim pokusom (EN 10002) ispitane su četiri epruvete izvađene iz zavarenih ploča. Dvije epruvete bile su iz dijela koji nije podvrgnut toplinskoj obradi (samo zagrijan na  $200^{\circ}\text{C}/2\text{h}$  s ciljem uklanjanja vodika), a druge dvije epruvete su iz dijela koji je prošao toplinsku obradu (dijagram toplinske obrade prikazan na slici 34). Ukupni prirast naprezanja prilikom ispitivanja bio je  $6 \text{ N/mm}^2\text{s}$ . Na slici 38 prikazane su potrgane epruvete na kojima se vidi da se lom dogodio u osnovnom materijalu. U tablici 11 prikazani su rezultati dobiveni ispitivanjima.

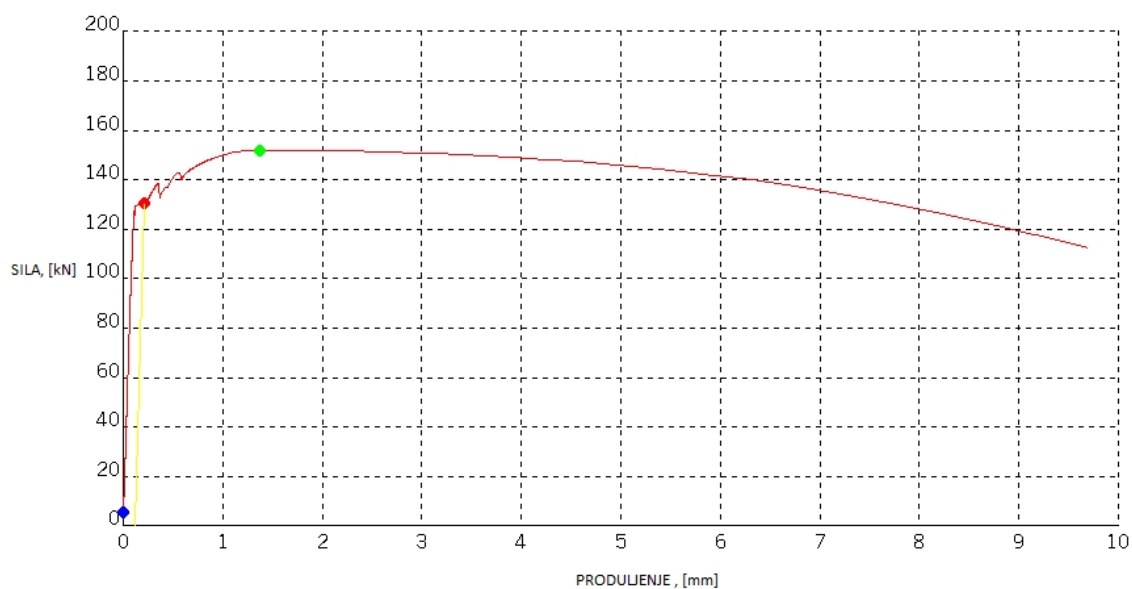
Tablica 11. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

		$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [kN]	$F_b$ [kN]	$\Delta L$ [mm]	$A$ [%]
<b>Dio 1 – bez T.O.</b>	<i>Epr. 1-1</i>	416,75	485,57	151,78	85,92	22,23	18,5
	<i>Epr. 1-2</i>	442,82	488,97	152,85	86,56	23,27	19,4
<b>Dio 2 – Sa T.O.</b>	<i>Epr. 2-1</i>	459,10	488,84	153,42	90,03	24,22	20,18
	<i>Epr. 2-2</i>	456,75	489,62	153,05	85,53	24,45	20,38

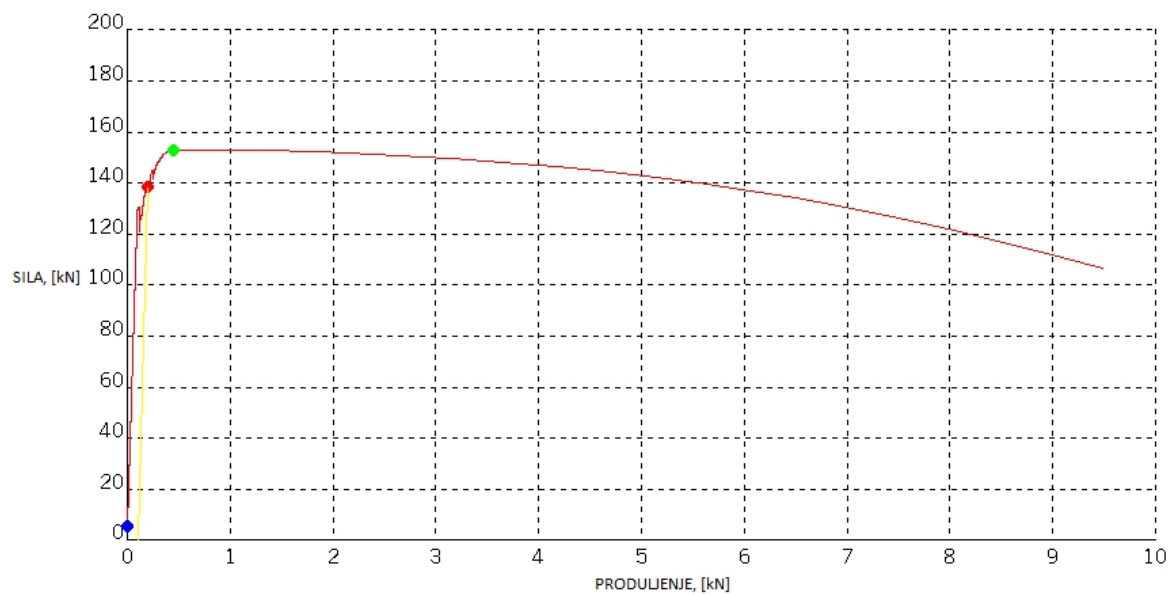


Slika 38. Epruvete za statički vlačni pokus nakon provedenog ispitivanja

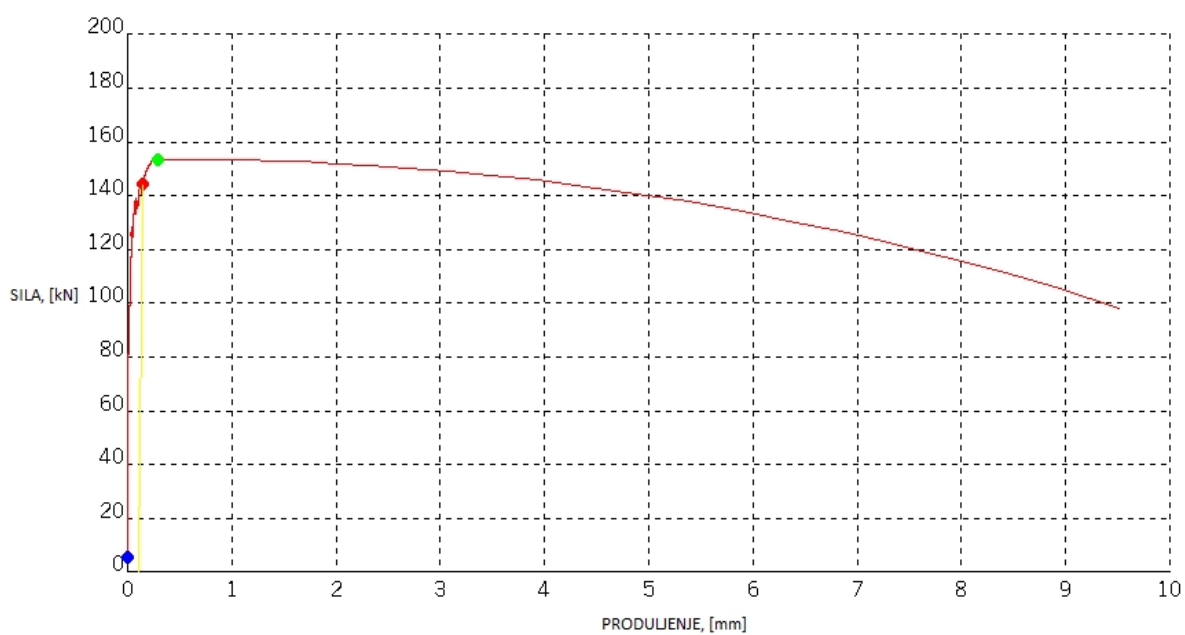
U nastavku su prikazani dijagrami „sila – produljenje“ dobiveni statičkim vlačnim ispitivanjem.



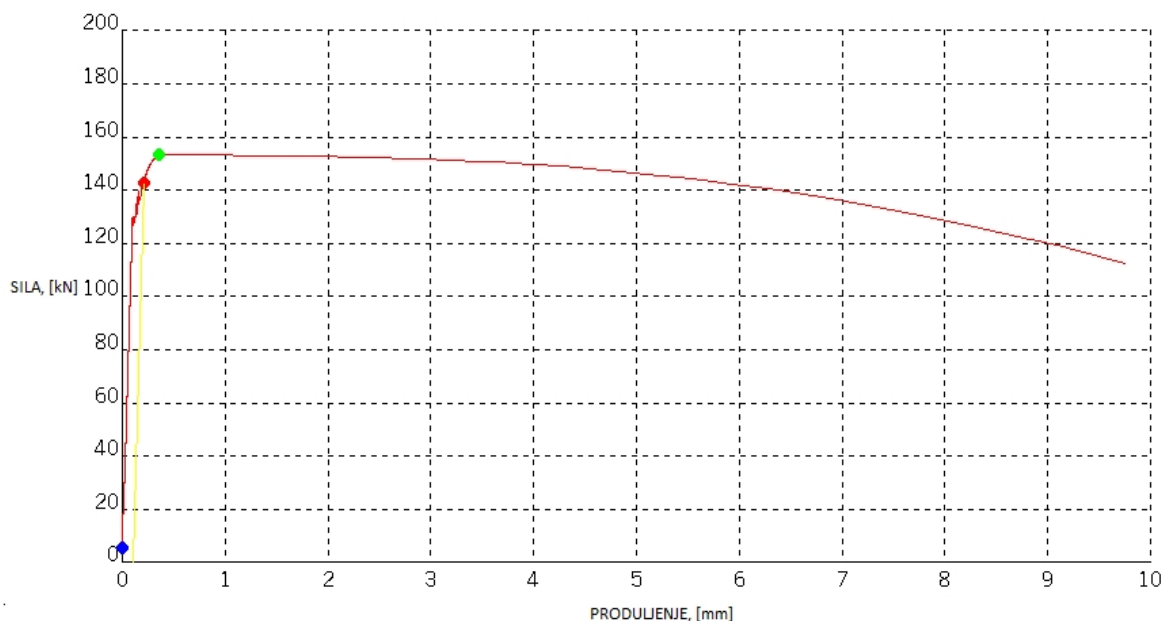
Slika 39. Dijagram „sila – produljenje“ za epruvetu 1-1



Slika 40. Dijagram „sila – produljenje“ za epruvetu 1-2



Slika 41. Dijagram „sila – produljenje“ za epruvetu 2-1



Slika 42. Dijagram „sila – produljenje“ za epruvetu 2-2

Rezultati provedenog statičkog vlačnog ispitivanja pokazuju da uzorci napravljeni iz toplinski obrađenog dijela imaju nešto veću vrijednost konvencionalne granice razvlačenja  $R_{p0,2}$  te da su ostvarili nešto veći iznos produljenja. Izraženo u postotnim jedinicama, toplinski obrađeni uzorci ostvarili su 10,4% veći iznos  $R_{p0,2}$ , i 7,5% veću istezljivost ( $A$ ). Iznosi vlačne čvrstoće za sve uzorke su približno jednaki, što ukazuje na to da toplinska obrada nije imala negativan učinak na to svojstvo.

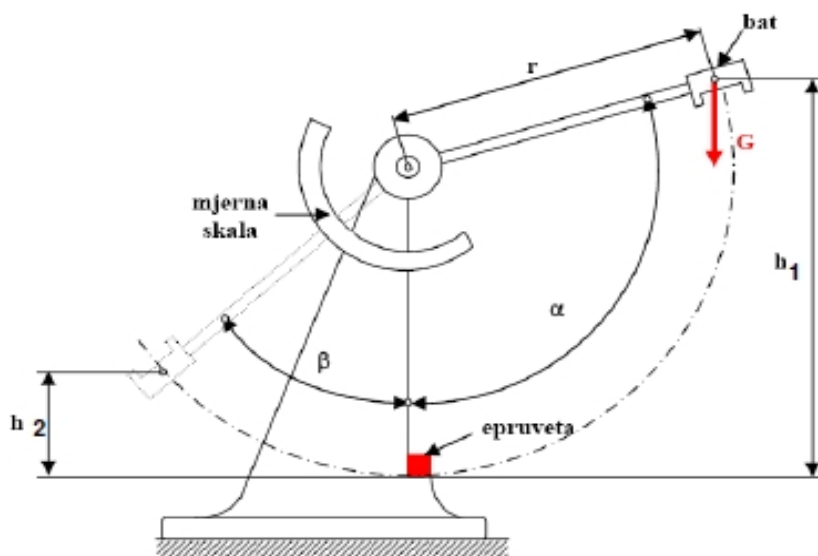
Provedeno ispitivanje pokazuje da uzorci iz toplinski obrađenog radnog komada imaju nešto bolja svojstva istezljivosti i nešto veći iznos konvencionalne granice razvlačenja. Međutim, upitno je da li ta poboljšanja opravdavaju izvođenje toplinske obrade, koja u proizvodnji može izazivati visoke troškove. U nastavku rada provedena su još ispitivanja žilavosti i tvrdoće, čiji su rezultati dodatno pomogli u utvrđivanju opravdanosti ili neopravdanosti toplinske obrade.

### 14.2. Ispitivanje udarnog rada loma (žilavosti) – metoda Charpy

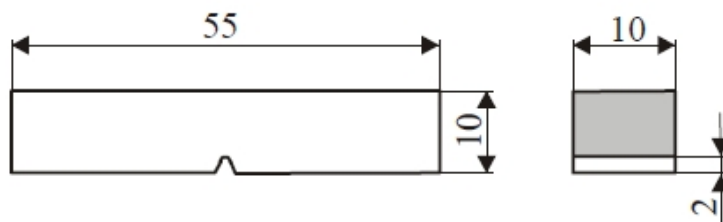
Ispitivanje udarnog rada loma provodeno je s ciljem utvrđivanja ponašanja materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Ispitivanje se provodi na Charpyevom batu (slika 43). Bat težine  $G$  podiže se na visinu  $h_1$  te s obzirom na ravninu u kojoj se nalazi ispitni uzorak, posjeduje potencijalnu energiju  $E_p = G \cdot h_1$ , ( $N \cdot m = J$ ). Puštanjem bata iz početnog položaja njegova potencijalna energija prelazi u kinetičku. U najnižem položaju sva se potencijalna energija pretvorila u kinetičku energiju. U tom trenutku brzina bata ( $v$ ) iznosi 6 m/s. Ukoliko na oslonac nije postavljen ispitni uzorak bat se penje na istu visinu s koje je i pušten (ako se zanemari trenje u ležaju i otpor zraka). Udarni rad loma zatim se računa prema jednadžbi:

$$KV = G \cdot (h_1 - h_2), [J] \quad (4)$$

Izgled i dimenzije ispitnih uzoraka prikazani su shematski na slici 44.



Slika 43. Shema Charpyevog bata za ispitivanje udarnog rada loma [26]



Slika 44. Dimenzije uzoraka za ispitivanje udarne radnje loma [26]

Rezultati ispitivanja ukazuju na žilavost ili krhkost materijala, pa tako što veći iznos udarnog rada loma ukazuje na žilaviji materijal. U pravilu materijali veće istezljivosti imaju i veći iznos KV i obrnuto.

Kod nekih materijala se vrijednost KV značajno smanjuje sa sniženjem temperature ispitivanja, ovisno o vrsti kristalne rešetke, odnosno o vrsti materijala. Čelik SA 516 Gr.70 Mod LTV je čelik koji se često primjenjuje na sniženim temperaturama na kojima zadržava zadovoljavajući iznos udarnog rada loma. Za ovaj slučaj provedeno za ispitivanje žilavosti na 0 °C.

Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za mehanička ispitivanja FSB-a u Zagrebu. Charpyev bat koji se tamo nalazi ne može mjeriti iznad KV=300 J, pa se zbog toga nisu mogli utvrditi točni iznosi žilavosti iznad te vrijednosti. Uzorci i ispitivanje provedeno je prema EN 875:1995 [25] i EN ISO 15614-1:2004 [23].

Za potrebe ispitivanja izrađeno je ukupno 12 epruveta, po 6 iz toplinski obrađenog i neobrađenog dijela. Provedena su ispitivanja žilavosti u metalu zavora (MZ) i u ZUT-u, a dobiveni rezultati prikazani su u tablici 12.

Tablica 12. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma (pri 0°C)

	KV (0°C), [J]					
<b>Dio 1 – bez</b>	MZ 1	MZ 2	MZ 3	ZUT 1	ZUT 2	ZUT 3
<b>T.O.</b>	134	155	198	210	274	298
<b>Dio 2. – sa</b>	MZ 1	MZ 2	MZ 3	ZUT 1	ZUT 2	ZUT 3
<b>T.O.</b>	212	213	199	298	298	298

Rezultati pokazuju relativno visoke iznose udarnog rada loma, s tim da uređaj može izmjeriti maksimalni rad od 300 J. Zamjećuje se da zona utjecaja topline posjeduje veću žilavost od samog metala zavora, a isto tako primjetno je da je toplinska obrada povoljno utjecala na materijal. Naime, u prosjeku metal zavora ima za 46 J viši iznos udarne radnje loma kod uzoraka iz toplinski obrađenog radnog komada, a i u ZUT-u je veća žilavost nakon toplinske obrade.

### 14.3. Mjerenje tvrdoće – Vickers metoda

Tvrdoća se opisno definira kao otpornost materijala prema prodiranju ili zarezivanju drugim znatno tvrdim tijelom. Pri tome ovo tvrde tijelo može biti dijamant (kao najtvrdi prirodni materijal) ili neki drugi tvrdi materijal (kaljeni čelik, tvrdi metal). Tvrdoća nije fizikalno egzaktno definirano svojstvo, međutim njeno ispitivanje je jednostavno, brzo, bez većeg oštećivanja površine materijala, a dobiveni rezultati su u dobroj korelaciji s nekim drugim mehaničkim svojstvima (npr.  $R_m$ ). Za ispitivanje tvrdoće nisu potrebni posebno izrađeni uzorci već je ispitivanje moguće, ovisno o metodi, na poluproizvodima ili čak na gotovim proizvodima. Od niza metoda ispitivanja tvrdoće u strojarstvu se ističu slijedeće tri, nazvane prema autorima koji su ih prvi primijenili:

- Vickers
- Brinell
- Rockwell

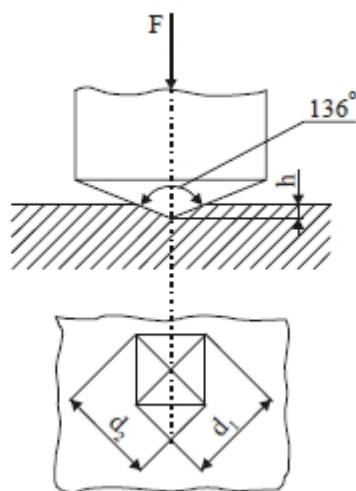
Za ispitivanje tvrdoće u ovom eksperimentu korištena je metoda po Vickersu (HV10). Ovom metodom moguće je ispitivati tvrdoću svih tehničkih i prirodnih materijala, a tvrdoća nije ovisna o primijenjenoj sili. Ovo je ostvareno primjenom dijamantnog indentora posebne geometrije, u obliku istostrane četverostrane piramide s kutom između stranica od  $136^\circ$ . Ovakav indenter omogućuje ispitivanje tvrdoće neovisne o primijenjenoj sili, pa se tvrdoća mekih materijala i tvrdih materijala može ispitivati primjenom iste sile. Utiskivanjem ovakvog penetratora u materijalu ostaje otisak oblika piramide. Tvrdoća se određuje prema jednadžbi (3) pri čemu se mjernim mikroskopom izmjere dijagonale ( $d_1$ ,  $d_2$ ) baze piramide otisnute u materijalu pri čemu se mjernim mikroskopom izmjere dijagonale ( $d_1$ ,  $d_2$ ) baze piramide otisnute u materijalu.

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{F \cdot 0,189}{d^2} \quad (5)$$

$F$  - primijenjena sila, ( $F = 49 \dots 981$  N),  $S$  - površina šuplje piramide otisnute u materijalu,  $\text{mm}^2$ ,  $d$  – srednja vrijednost dijagonala baze piramide u mm,  $d = (d_1 + d_2)/2$ , mm

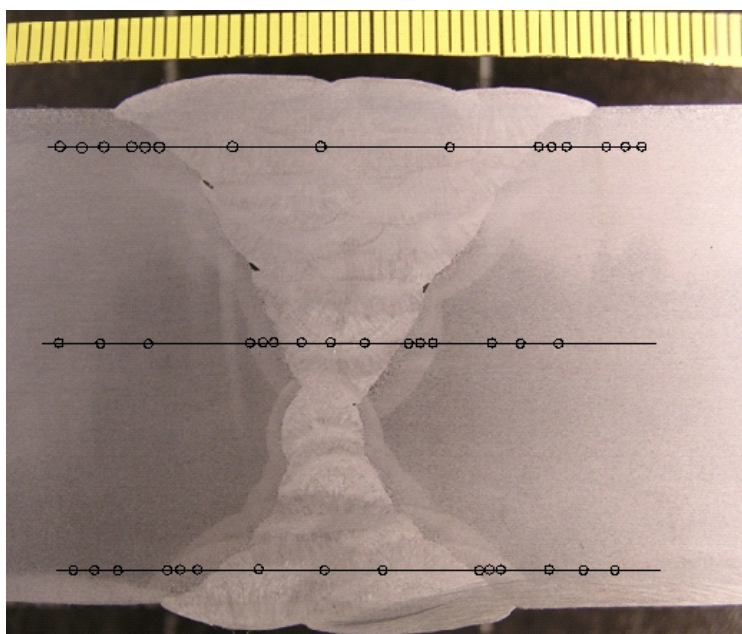


Na slici 45 shematski je prikazan indentor i otisak kod ispitivanja po metodi Vickers.

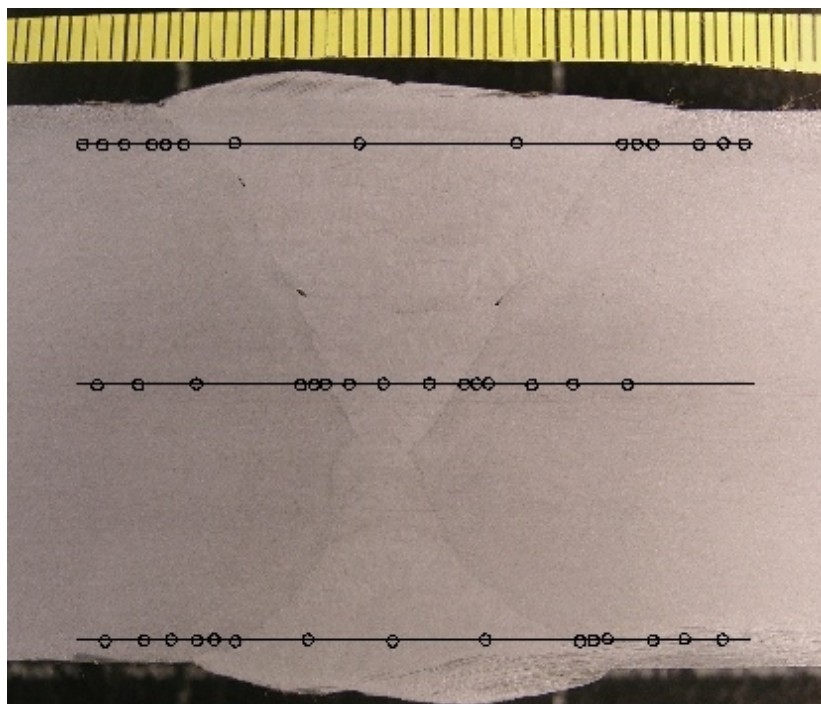


Slika 45. Shematski prikaz indentora i otiska kod metode po Vickersu [26]

Kod Vickersove metode tvrdoća se određuje na osnovi veličine otiska. Mjerno mjesto prije ispitivanja tvrdoće treba biti odgovarajuće pripremljeno (brušeno i eventualno polirano) da bi se osigurala refleksija svjetlosti za mjerenje dijagonale otiska u mjernom mikroskopu. Iz tog razloga izrađena su dva makroizbruska (slike 46 i 47), te su na njima izmjerene vrijednosti tvrdoća.



Slika 46. Makroizbrusak iz dijela bez toplinske obrade s označenim točkama mjerenja tvrdoće



Slika 47. Makroizbrusak iz dijela podvrgnutog toplinskoj obradi s označenim točkama mjerenja tvrdoće

Makroizbrusci su izrađeni u nekoliko koraka. Nakon plinskog izrezivanja iz zavarenog komada, uslijedila je strojna obrada glodanjem kako bi se dobila površina pogodna za brušenje i poliranje. Brušenje je izvedeno ručno, na brusnim papirima oznake P320 i P500, nakon čega je uslijedilo strojno poliranje na brusnim papirima oznake P600, P1200, P2500 i P4000. Broj iza oznake P označava finoću brusnog papira (veći broj znači veću finoću). Nakon poliranja, uzorci su nagrizeni u nitalu - otopini dušične kiseline u alkoholu etanolu, s udjelom dušične kiseline od 3 %. Slike makroizbrusaka izrađene su fotoaparatom marke Olympus.

Bitno je napomenuti da se na makroizbruscima uočavaju greške u zavaru. Došlo je do naljepljivanja zbog uključka troske na tri mjesta uz liniju staljivanja. Zbog velike debljine materijala te greške nisu imale utjecaj na rezultate bilo kojeg od provedenih ispitivanja.

Za provođenje ispitivanja tvrdoće koristila se metoda po Vickersu uz primjenu sile od 10 kiloponda ili 98,04N – metoda HV10. Mjerenja su provedena na oba uzorka, sa ukupno 45 mjerenja po uzorku (na tri pravca po petnaest mjerenja). Linije mjerenja tvrdoća nalazile su se 2 mm ispod gornje granice uzorka, u sredini, te 2 mm iznad donje granice uzorka. Ovo

ispitivanje provedeno je prema EN 1043-1:1995 [27] i prema EN ISO 6507-1:2005 [28]. U tablici 13 prikazani su dobiveni rezultati sa izračunatim prosječnim tvrdoćama osnovnog materijala, ZUT-a i metala zavora.

Tablica 13. Prosječni rezultati mjerenja tvrdoće u uzorcima





	Tvrdoća (HV10)		
Uzorak 1 – bez T.O.	Osnovni materijal	ZUT	Metal zavora
	166,7	188,1	194,8
Uzorak 2 – sa T.O.	Osnovni materijal	ZUT	Metal zavora
	168,4	180,8	189,1

Iz tablice je vidljivo da se toplinskom obradom u određenom dijelu smanjila tvrdoća u metalu zavora i u ZUT-u, što je bilo i očekivano, dok je osnovni materijal zadržao približno jednak iznos tvrdoće. Provođenjem ranijih ispitivanja žilavosti i statičkog vlačnog pokusa moglo se naslutiti da je tvrdoća toplinskom obradom u određenoj mjeri snižena. To je tako jer postoji određena međuzavisnost mehaničkih svojstava, pa tako veća tvrdoća u pravilu znači veću krhkost i veću čvrstoću materijala.

## 15. ANALIZA REZULTATA MEHANIČKIH ISPITIVANJA

U sklopu ekperimenta provedena su ispitivanja tri najvažnija mehanička svojstva materijala – statički vlačni pokus, ispitivanje udarnog rada loma i mjerenje tvrdoće. U tablici 14 prikazan je utjecaj toplinske obrade na svojstva zavarenog spoja.

Tablica 14. Utjecaj toplinske obrade na mehanička svojstva zavarenog spoja

UTJECAJ TOPLINSKE OBRADE NA SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA	$R_m$ , [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2}$ , [N/mm <sup>2</sup> ]	$A$ , [%]	$KV(0^\circ\text{C})$ , [J]	HV10
	Neznatan utjecaj	10,4 % 	7,5 % 	28 % u metalu zavara 	Smanjenje tvrdoće u metalu zavara (3 %) i u ZUT-u (4%) 

Ovaj tablični prikaz pokazuje nam da je toplinska obrada imala pozitivan utjecaj na mehanička svojstva zavarenog spoja. Konkretnije, konvencionalna granica razvlačenja povećana je za 10,4 %, istezljivost je povećana za ukupno 7,5 %, dok je žilavost u metalu zavara povećana, u prosjeku, za čak 28%. Došlo je i do očekivanog smanjenja tvrdoće, u ZUT-u za 4%, a u metalu zavara za 3%.

S obzirom na dobivene rezultate može se zaključiti kako je provedena toplinska obrada dovela do poboljšanja mehaničkih svojstava u određenoj mjeri. Međutim, ispravnost i isplativost njene primjene zahtjeva detaljniju analizu. Budući da primjena toplinske obrade u industriji izaziva relativno visoke financijske troškove, potrebno je detaljno ustvrditi da li svojstva zavarenog spoja bez naknadne obrade zadovoljavaju projektne zahtjeve.

Budući da čelik SA516 Gr.70 Mod LTV pripada u grupu sitnozrnatih TMCP čelika koji imaju vrlo dobra mehanička svojstva koja se zavarivanjem bitno ne smanjuju, naknadna toplinska obrada bi izazivala dodatne troškove u proizvodnji. Iz tog razloga, može se donijeti zaključak kako toplinska obrada poboljšava mehanička svojstva zavarenih spojeva iz čelika SA516 Gr.70 Mod LTV, ali isplativost njene primjene ovisi o zahtjevnosti i odgovornosti

konstrukcije. Tako se kod izrade nekih odgovornih ili rizičnih konstrukcija (najčešće spremnika i sl.) može provesti naknadna toplinska obrada zavarenih spojeva, čime će se svojstva i sigurnost konstrukcije dići na nešto višu razinu. Pri tome u obzir treba uzeti sve utjecajne faktore, prije svega sigurnost i stabilnost konstrukcije uz primjenu naknadno toplinski neobrađenih zavarenih spojeva, te cijenu i isplativost toplinske obrade ukoliko je ona neizbježna.

## 16. ZAKLJUČAK

U ovom radu, prikazane su osnove toplinske obrade u tehnologiji zavarivanja, a posebno je pažnja obraćena na sitnozrnate čelike, njihova svojstva, zavarljivost i utjecaj toplinske obrade nakon zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu odrađena su ispitivanja mehaničkih svojstava toplinski obrađenog i toplinski neobrađenog zavarenog spoja čelika SA516 Gr.70 Mod LTV, te je provedena komparativna analiza dobivenih rezultata. Cilj eksperimenta bio je određivanje utjecaja toplinske obrade na svojstva zavarenog spoja i donošenje odluke o optimalnoj tehnologiji zavarivanja i toplinske obrade.

Nakon izvođenja zavarivanja, jedan dio radnog komada podvrgnut je toplinskoj obradi (dijagram na slici 34), dok je drugi komad tek zagrijavan 2 sata na 200 °C radi otpuštanja vodika. Po završetku toplinske obrade izrađeni su uzorci na kojima su provedena ispitivanja mehaničkih svojstava.

Analizom dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Toplinska obrada imala je pozitivan utjecaj na mehanička svojstva zavarenog spoja. Povećane su vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja ( $R_{p0,2}$ ), istežljivosti ( $A$ ) i žilavosti ( $KV$ ).
- Dobivena poboljšanja u svojstvima ne znače da je potrebno provesti toplinsku obradu jer je zavareni spoj i bez toplinske obrade zadržao dobra mehanička svojstva nakon zavarivanja.
- Analizom isplativosti naknadne toplinske obrade zavara u odnosu na poboljšanja mehaničkih svojstava u nekim slučajevima može se u proizvodni sustav uvesti primjena toplinske obrade zavarenih spojeva od čelika SA516 Gr.70 Mod LTV.

Da bi se zavarivanjem dobio kvalitetan zavareni spoj od ove vrste čelika, potrebno je prilikom zavarivanja posebnu pažnju obratiti na unos topline, koji je za ove čelike maksimalno 15 kJ/cm. Ukoliko je zavarivanje izvedeno ispravno i uz odgovarajuće parametre, toplinska obrada zavarenog spoja najčešće neće biti potrebna, unatoč tome što će donijeti određena poboljšanja u mehaničkim svojstvima.

## LITERATURA

- [1] Colegrove, P.; Williams, S.; Nagy, T.; Pirling, T.; *The welding process impact on residual stress and distortion*; Science and Technology of Welding and Joining, vol.14; str 717 – 725;
- [2] Šisl, V.; Kovačević, B.; *Toplinska obrada u zavarivanju (prvi dio)*, Zavarivanje 44 (1/2), str. 7.-15.; 2001.
- [3] Bauer, B.; *Zaostala naprezanja i deformacije*, predavanja FSB, Zagreb
- [4] Paleka, M.; *Upravljanje procesima toplinske obrade metala* (diplomski rad); Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [5] Gojić, M.; *Tehnike spajanja i razdvajanja materijala*; Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet; Sisak, 2003.
- [6] Juraga, I.; Živčić, M.; Gracin, N.; *Reparaturno zavarivanje*; Vlastita naknada, Zagreb, 1994.
- [7] .....; [https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/to\\_obr.html](https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/to_obr.html) - 13.4.2014.
- [8] Šisl, V.; Kovačević, B.; *Toplinska obrada u zavarivanju (drugi dio)*; Zavarivanje 45 (3/4), str. 97-104, 2002.
- [9] Toten, G.E.; *Steel heat treatment metallurgy and technologies*; Portland State University; Portland, SAD; 2006.
- [10] Grbin, M., Vukšić, J.; *Toplinska obrada materijala prije i nakon zavarivanja*, 6. Seminar, Novine u tehnologiji zavarivanja i srodnim tehnikama; Pula, 2010.
- [11] Šisl, V.; Kovačević, B.; *Toplinska obrada u zavarivanju (prvi dio)*, Zavarivanje 45 (5/6), str. 155-164. ; 2002.
- [12] .....; <http://wiki.iploca.com/display/rtswiki/9.7+Field+construction+equipment> - 15.04.2014.
- [13] .....; <http://www.thefabricator.com/article/tubepipefabrication/welding-chromium-molybdenum-steel-pipe-for-power-plants> 16.04.2014.

- [14] .....;  
<http://www.nickelalloys.com.br/Metrode%20CD%202011/Technical%20Literature/CrMo%20-%20P92/P92%20paper-IIW%20Conference-Graz.pdf> 17.04.2014.
- [15] Despotović, B., Marsenić, T., Brechelmacher, B., Birač, D.; *Neka iskustva pri zavarivanju čelika T/P92*; 4. Međunarodno stručno savjetovanje – Tehnološka primjena postupaka zavarivanja, Slavonski Brod, 2007
- [16] .....; [http://en.wikipedia.org/wiki/Dragline\\_excavator](http://en.wikipedia.org/wiki/Dragline_excavator) 22.04.2014.
- [17] Paradowska, A., Price, J., Kerezsi, B., Ibrahim, R.; *Measurement of residual stress distribution in tubular joints considering post weld heat treatment*; Materials forum volume 30, 2006.
- [18] Markulin, I.; *Reparaturno zavarivanje sitnozrnatih čelika za kamionske šasijske (diplomski rad)*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [19] Smiljanić, M.; *Finozrni čelici – sposobnost zavarivanja i zavarivanje*; Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Beograd, 2006.
- [20] Novosel, M.; Krumes, D.; *Željezni materijali II dio: konstrukcijski čelici*, SFSB, 1995
- [21] Tomić, T.; *Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80* (doktorski rad), Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [22] .....; Norma EN ISO 9692-1
- [23] .....; Norma HRN EN ISO 15614-1, Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – Ispitivanje postupka zavarivanja – 1. dio: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika te elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla (ISO 15614-1:2004; EN ISO 15614-1:2004)
- [24] .....; Norma EN 895:1995, Destructive tests on welds in metallic materials —Transverse tensile test
- [25] .....; Norma EN 875:1995, Kerbschlagbiegeversuch – Probenlage, Kerbrichtung und Beurteilung
- [26] Landek, D.; *Materijali i proizvodni postupci* (autorizirana predavanja), TVZ, Zagreb, 2012.




[27] .....; Norma HRN EN 1043-1:1995, Razorna ispitivanja zavara metalnih materijala – Ispitivanje tvrdoće – 1. dio: Mjerenje tvrdoće elektrolučno zavarenih spojeva (EN 1043-1:1995)

[28] .....; Norma EN ISO 6507-1:2005, Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1: Test method


## PRILOZI

## Specifikacija dodatnog materijala



**Seamless flux-cored wire**

## STEIN-MEGAFIL® 550 R



**Type:** Micro-alloy rutile flux-cored wire with rapidly solidifying slag for Ar-CO<sub>2</sub> mix.

**Applications:** Shipbuilding, steel and vessel construction, mechanical engineering and pipe work. Fine grain structural steel with yield strength up to 550 MPA (80 ksi).

**Properties:** Excellent weld puddle manipulation, superior out-of-position welding. Using temperature up to - 60 °C (- 76 °F). Particularly suited for MAG orbital welding applications and all-position welding on ceramic backing. Low spatter loss, easy slag removal.

**Classification:**

EN ISO 18276-A EN ISO 18276-B AWS ASME 5.29 AWS ASME 5.29M	T 55 6 Mn1Ni P M 1 H5 T766T1 1MA N2M1 H5 E91T1-K2M-J H4 E621T1-K2M-J H4
---	--

Materials:	DIN	EN	ASTM
TM-pipe steels	up to StE 550.7 TM	up to L550M	typical HY80
high-strength fine grain structural steels (tempered)	up to StE 550 V	up to S550QL	
high-strength fine grain structural steels (low temp)	up to EStE 550 VA	up to S550G1QL1	
steels to API-standard	X 42 - X 80		

**Approvals:** ---

**Weld metal analysis % (typical values for mixed gas M21 82% Ar / 18% CO<sub>2</sub>)**

C	Mn	Si	P	S	Ni
< 0,08	1,5	0,5	< 0,015	< 0,015	1,0

**Mechanical properties of the pure weld metal (typical values for mixed gas)**

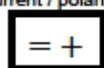
Heat-treatment	R <sub>p0.2</sub> MPa (ksi)	R <sub>m</sub> MPa (ksi)	A5 %	Charpy V Notch [J] (ft.lb)	
				- 40 °C (- 40 °F)	- 60 °C (- 76 °F)
AW	≥ 550 (80)	640 - 760 (93 - 111)	> 18	> 60 (44)	>55 (41)

AW: as welded

**Diameters:** Ø 1.2 mm (0.045 inch)

**Packaging information:** see chapter H

current / polarity



welding position

